

Estudio sobre la autonavegación en buques mercantes

Trabajo Final de Grado



Facultad de Náutica de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña

Trabajo realizado por:
María Valero Pérez

Dirigido por:
Rosa Maria Fernández

Grado en Tecnologías Marinas

Barcelona, 10 de mayo de 2019

Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e
Informática Industrial

Agradecimientos

Agradezco a Rosa, mi tutora, por todo el apoyo, ayuda y conocimientos que me ha otorgado en mi trabajo final de grado.

Agradezco a mis padres por su esfuerzo y motivación a lo largo de mi grado y etapa final.

Agradezco en especial a mi hermano Jose por toda la ayuda y por todo el apoyo que siempre me ha brindado a lo largo de la realización del grado y de mi vida personal.

También quiero nombrar a mis mejores amigas por su apoyo incondicional y felicitarlas por sus logros académicos.

Resumen

En este trabajo final de grado se analiza la idea de un futuro con buques mercantes autónomos.

La parte teórica explica cómo ha evolucionado la autonomía del transporte, ya sea terrestre o marítimo, pero sobretodo en el sector marítimo. Expone cuáles son muchos de los prototipos que están siendo diseñados por diferentes asociaciones marítimas y diferentes compañías en todo el mundo, los pros y los contras de estos buques, los aspectos que tenemos que tener en cuenta durante la navegación autónoma y el cambio en la legislación marítima que implica todo esto.

En la parte práctica, se verifica por simulación un algoritmo de evitación de obstáculos basado para un buque tiene una ruta programada con una velocidad asignada, sin tripulación a bordo y con un obstáculo en el transcurso de la ruta que ha de esquivarlo.

Abstract

In this final degree project, the idea of a future with autonomous merchant ships is analyzed.

The theoretical part explains how transport autonomy has evolved, whether terrestrial or maritime, but above all in the maritime sector. It exposes which are many of the prototypes that are being designed by different maritime associations and different companies around the world, the pros and cons of these ships, the aspects that we have to take into account during the autonomous navigation and the change in legislation maritime that implies all this.

In the practical part, an obstacle avoidance algorithm is verified by simulation based on a ship that has a programmed route with an assigned speed, without crew on board and with an obstacle in the course of the route that has to dodge it.

Tabla de contenidos

Listado de figuras.....	8
Capítulo 1. Introducción.....	10
1.1. Motivación del trabajo	10
1.2. Objetivos del trabajo	12
1.3. Organización de la memoria	13
Capítulo 2. Buques autónomos, ¿verdad o mentira?	14
2.1. Historia del transporte autónomo	14
2.1.1. Por tierra	14
2.1.2. Por mar	16
2.2. Estudios ya realizados o activos sobre los buques autónomos	17
Capítulo 3. Pros y contras de los buques autónomos.	30
3.1. Pros.....	30
3.2. Contras.....	31
Capítulo 4. Aspectos a considerar en la navegación de los buques autónomos	35
4.1. La detección del entorno	35
4.2. La climatología	36
4.3. Ruta a seguir	37
4.4. Comportamiento de las olas.....	38
4.5. Funciones desempeñadas por el oficial de puente	38
4.6. Seguridad cibernética	39
4.7. Sistema de tanques de lastre	39
Capítulo 5. Nueva legislación de los buques autónomos.....	41
5.1. SOLAS (<i>International Convention for the Safety of Life at Sea</i>)	41
5.2. MARPOL (<i>International Convention for the Prevention of Pollution from Ships</i>).....	43
5.3. COLREG (<i>International Regulations for Preventing Collisions at Sea</i>)	44
5.4. STCW (<i>International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers</i>).....	45

5.5. MLC (<i>Maritime Labour Convention</i>).....	46
5.6. Código Lloyd's Register para buques autónomos	46
Capítulo 6. Diseño e implementación de un algoritmo de evitación de obstáculos	49
6.1. Control inteligente en buques.....	49
6.2. Diseño del algoritmo	50
6.3. Modelo predictivo de la dinámica del buque	51
6.4. Controlador y restricciones.....	52
6.5. Simulación del comportamiento.....	53
Capítulo 7. Conclusiones	60
Bibliografía y referencias.....	62
Apéndices	68
- Modelo_barco	68
- Actualizar_restricciones	68
- Evitación_obstaculos	70

Listado de figuras

<i>Figura 1. Ciclo buques autónomos Introducción [1]</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. Ruta a seguir por el Yara [18]</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3. Estructura del Yara [19]</i>	<i>21</i>
<i>Figura 4. Desamarre y salida de puerto [19]</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5. Navegación autónoma [19]</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6. Buque autónomo ReVolt [22]</i>	<i>22</i>
<i>Figura 7. Buque autónomo Rolls Royce [28]</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8. Estación de control terrestre [31]</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9. Detección del entorno de un buque autónomo [30]</i>	<i>26</i>
<i>Figura 10. RAMora [33]</i>	<i>28</i>
<i>Figura 11. Hrönn [35]</i>	<i>29</i>
<i>Figura 12. Sistema de control de un buque [47]</i>	<i>49</i>
<i>Figura 13. Trayectoria del buque autónomo.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 14. Comportamiento de x, y, ϕ y v</i>	<i>55</i>
<i>Figura 15. Comportamiento de a y δ</i>	<i>56</i>
<i>Figura 16. Velocidad 18kn</i>	<i>57</i>
<i>Figura 17. Detección a 8 veces la eslora del barco</i>	<i>58</i>
<i>Figura 18. Detección a 2 veces la eslora del barco.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 19. Detección a 2 veces la eslora del barco pero zona segura más reducida.</i>	<i>59</i>

Capítulo 1. Introducción

1.1. Motivación del trabajo

El transporte marítimo, en 2018, fue el responsable de la movilización del 90% del comercio mundial, proporcionó alimentos y productos esenciales para la población mundial. El transporte de los alimentos y de materias primas se realizó a bordo de más de 51.400 buques mercantes de 150 naciones diferentes operados por más de 774.000 oficiales y 873.000 tripulantes de diferentes nacionalidades. [1]

También se puede decir que trabajar en barcos mercantes es uno de los empleos más peligrosos del mundo ya que hay muchos accidentes y muchos de ellos mortales. Sí que es cierto que el número de accidentes a bordo se ha reducido gracias a los avances en normativa de la Organización Marítima Internacional (OMI)¹ que han propiciado la incorporación de los avances tecnológicos.

Son estos avances tecnológicos los que, poco a poco, han hecho que la operación de los buques sea cada vez más automática de manera que, recientemente, la automatización también se ha introducido en el ámbito de la navegación. Según el grado de automatización, de menos a más, podemos hablar de sistemas de apoyo a las decisiones, de buques controlados por control remoto humano y, finalmente, de navegación totalmente autónoma. [poner la ref del artículo donde salía esto]

Sobre el tema de los buques autónomos hay muchas y distintas reacciones generadas en el ámbito marino y comercial ya que existe una inclinación muy fuerte a rechazar su utilización debido a una sucesión de argumentos que veremos a lo largo del presente trabajo.

Sin embargo, el desarrollo de los buques sin tripulación, su construcción y puesta en marcha no considera su aplicación inmediata, sino que será a través de un procedimiento progresista que contemple los siguientes objetivos: [1]

¹ Organización Marítima Internacional, es el organismo especializado de las Naciones Unidas responsable de la seguridad y protección de la navegación y de prevenir la contaminación del mar por los buques. <http://www.imo.org/es/Paginas/Default.aspx> [2]

- En el 2020, se tiene como objetivo la reducción de tripulación mediante un soporte remoto en ciertas labores. Para este año también se considera el inicio de las operaciones de buques operados remotamente de tráfico local.
- Para el 2025 se prevé la opción de buques autónomos operando sin tripulación en tráfico costero.
- En 2030 se prevé que estén operando buques controlados remotamente de tráfico oceánico.
- Finalmente, en 2035 se espera que los buques autónomos oceánicos naveguen sin dotaciones.

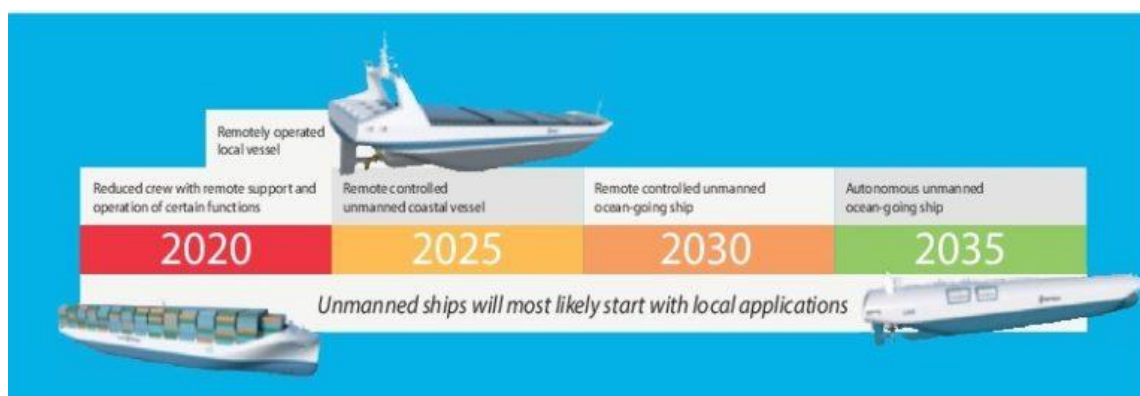


Figura 1. Ciclo buques autónomos Introducción [1]

Con respecto al estado actual, Rolls Royce está trabajando en el diseño de un buque porta contenedores con capacidad de transportar hasta 120 TEU², siendo la primera nave no tripulada propulsada eléctricamente con el empleo de baterías, lo que al mismo tiempo disminuye las emisiones de Óxido de Nitrógeno (NOx) y Dióxido de Carbono (CO₂).

Este diseño estudia además la eliminación de la superestructura destinada a la habitabilidad de la tripulación, sistemas de soporte de vida como el aire acondicionado, agua potable y servicio hotel, lo que permitiría el aumento de zona de carga y reducción de costes, así como el aumento de ganancias.

Por otro lado, los buques deberían reducir su desplazamiento en un 5% consumiendo así entre un 12 y 15% menos de combustible, según el estudio de la Universidad de Oslo [3]. La

² La sigla TEU (acrónimo del término en inglés *Twenty-foot Equivalent Unit*, que significa Unidad Equivalente a Veinte Pies) representa una unidad de medida de capacidad inexacta del transporte marítimo (buques portacontenedores y terminales portuarios para contenedores) expresada en contenedores. Una TEU es la capacidad de carga de un contenedor normalizado de 20 pies (6,1 m), una caja metálica de tamaño estandarizado que puede ser transferido fácilmente entre diferentes formas de transporte.

Universidad de Oslo apuesta en su tesis que las deficiencias de los buques tradicionales tienen un elemento común y ese elemento es el factor humano a bordo. La investigación de estas entidades encontró que una solución para superar los inconvenientes comunes podría lograrse alterando dos elementos: eliminar el factor humano cambiando la operación a bordo del buque por la operación desde tierra y la implementación de tecnología marítima moderna. Esto tendría un posible impacto sobre la industria marítima en términos de seguridad, eficiencia, rendimiento del combustible y protección del medio ambiente. El esquema alternativo que proponen varias compañías es tener buques sin tripulación controlados a distancia por humanos en instalaciones en tierra ayudados por el uso de la moderna tecnología automatizada remota.

Por otro lado, las operaciones con el Yara Bierkeland en Noruega permitirán la eliminación de 40.000 viajes anuales realizados con los camiones que transportan cargas desde la planta al puerto de distribución. Este proyecto considera la instalación de un puente desmontable con equipo para las maniobras y la navegación. A la hora de operación del buque de forma autónoma, el puente será apartado. Se prevé que este buque esté operando de forma totalmente autónoma en el 2020.

Así pues, el ámbito de los buques autónomos es un campo de estudio e investigación de actualidad y por ello es interesante estudiarlos. En el presente trabajo se presenta una panorámica del tema para a continuación centrarnos en un aspecto crucial que es la problemática de la evitación de obstáculos de manera automática. [4]

1.2. Objetivos del trabajo

El presente trabajo se enmarca en el ámbito de los buques autónomos en la marina mercante del futuro. Los objetivos concretos son:

- Presentar una panorámica del estado de la cuestión sobre el tema de los vehículos autónomos, tanto terrestres como, principalmente, marinos, mediante la recopilación de algunas de las tesis o estudios ya realizados o que se están realizando en diferentes regiones sobre este sistema.
- Analizar los pros y los contras de dichos buques.
- Determinar qué aspectos se deben considerar a la hora de iniciar una navegación autónoma, cómo estos aspectos pueden llegar a ocasionar problemas y cómo se pueden evitar o solucionar.

- Presentar como se verá modificada la legislación ante el desarrollo de la navegación autónoma.
- Abordar el problema concreto de la evitación de obstáculos. En concreto, desarrollar un algoritmo de evitación de obstáculos basado en el control adaptativo predictivo que sea capaz de indicar al piloto automático qué desviación segura de la ruta tiene que ejecutar para evitar un obstáculo y volver a la ruta original. El algoritmo debe ser capaz de definir una zona de seguridad alrededor de un obstáculo fijo y tener en cuenta otras restricciones como pueda ser la línea de costa.
- Programar en Matlab® el algoritmo de evitación de obstáculos y verificar por simulación su correcto funcionamiento.

1.3. Organización de la memoria

A continuación, se detallará la organización de la memoria por capítulos.

En el capítulo 2 se describe en nivel de autonomía que puede llegar a tener un buque, los transportes ya autónomos y las tesis y estudios que se están realizando sobre la navegación autónoma.

En el capítulo 3 se presentan los principales pros y contras de los buques autónomos.

En el capítulo 4 se describen los aspectos más importantes que se deben considerar en la navegación autónoma.

En el capítulo 5 se analiza el cambio en la legislación actual al implementarse esta tecnología.

En el capítulo 6 se describe el algoritmo y la simulación de un buque autónomo el cual durante la navegación ha de esquivar un obstáculo.

En el capítulo 7 se redactan las conclusiones sobre el futuro de los buques autónomos.

En el capítulo 8 se presentan las referencias.

Y finalmente se incluye un apartado de apéndices con el código Matlab del algoritmo.

Capítulo 2. Buques autónomos, ¿verdad o mentira?

En este capítulo veremos hasta qué punto los buques pueden llegar a ser autónomos partiendo de la base de la definición de autonomía que consta en la RAE (Real Academia Española de la Lengua), la cual la define como la condición de quien, para ciertas cosas, no depende de nadie o como el máximo recorrido o tiempo máximo que puede funcionar un vehículo sin repostar.[5]

Partiendo de la definición de autonomía, los buques autónomos deberían de ser capaces de no depender de nadie a la hora de la navegación, en la entrada y salida de puerto ni en el amarre ni el desamarre en puerto. Dicho esto, la definición de buque autónomo no correspondería con la que debería ser ya que un buque autónomo podría navegar sin tripulación a bordo pero siempre con una supervisión por un operario las 24 horas del día desde la estación de control terrestre, es decir, que ya estaría dependiendo de alguien ya que si este buque sufre una avería, se encontrase con un obstáculo o con un cambio en la meteorología, el propio buque tomaría la solución más adecuada pero el operario sería el que tendría la última palabra.

Teniendo en cuenta que actualmente la salida y entrada a puerto, cuando sea necesario, se hace mediante con los servicios de practica, en los buques autónomos deberíamos implementar un sistema por sensores y cámaras para facilitar y poder hacer las maniobras necesarias sin necesidad de los servicios de practica.

También tendríamos que tener en cuenta la hora del amarre y del desamarre del buque ya que esto en buques actuales lo hacen los amarradores. Es en estas operaciones también donde se han registrado una gran cantidad de accidentes y cada año se registran más. Sobre este tema ya hay sistemas de amarre que son semiautomáticos o automáticos como el vagón metálico semiautomático, el sistema de amarre por vacío o el amarre magnético.

2.1. Historia del transporte autónomo

2.1.1. Por tierra

El sueño de un transporte autónomo comenzó en el año 1925 por el inventor Francis Houdina cuando mostró su proyecto de un automóvil controlado por radio. Dicho vehículo podía encender el motor, cambiar de marchas y hacer sonar el claxon mediante radio.

Más tarde, en 1969, John McCarthy, padre de la inteligencia artificial, hizo un ensayo llamado *Computer Controlled Cars* donde el automóvil es capaz de circular por una vía pública a través

de una “entrada de cámara de televisión que utiliza la misma entrada visual disponible para un controlador humano” (extracto de la página web [6]). Los usuarios podían introducir un destino utilizando un teclado y con otros comandos adicionales podrían cambiar de destino, detenerse en algún lugar, acelerar o reducir la velocidad, en caso de cualquier emergencia. De este ensayo no se construye ningún vehículo.

Los avances en los vehículos autónomos son creación de Ernst Dickmanns, un profesor de la Bundeswehr University de Munich experto en inteligencia artificial que construyó el primer vehículo autónomo moderno. Esto lo consiguió con la combinación de la visión sacádica (movimiento rápido del ojo, cabeza u otras partes del cuerpo de animales o dispositivos) y los cálculos probabilísticos y computación paralela, utilizada hoy en día en los procesadores con múltiples núcleos.

En 1987, Ernst Dickmanns diseña una furgoneta mercedes-Benz consiguiendo que esta circule sin conductor por una autopista hasta la velocidad de 100 km/h sin tráfico.

Poco después, en 1994, un mercedes 500 SEL, apodado VAmP, recorrió más de 1000 km en la carretera de circunvalación que rodea París, adelantando incluso a otros vehículos y alcanzando hasta 130 km/h.

Un año después, en 1995, un mercedes clase S hizo 1678 km en autopista desde Munich hasta Dinamarca y el viaje de vuelta. Este consiguió alcanzar velocidades de hasta 175 km/h.

En 2004 la agencia estadounidense ARPA creó el DARPA Grand Challenge, un campeonato anual de vehículos autónomos.

Poco después llegó Google con su Google Car que revolucionó la industria.

Desde 2013, marcas importantes como General Motors, Ford, Audi, Mercedes Benz, BMW, trabajan en sus propias tecnologías autónomas. [7][8]

Hace poco se produjo la primera víctima mortal por un error de la conducción autónoma. Esto ocurrió el 7 de mayo de 2016 en la autopista de Florida, cuando un camión giró de forma indebida y casi perpendicular para tomar una salida hacia la izquierda. Esta maniobra no fue detectada por el sistema ni tampoco le dio tiempo al conductor a frenar así que el Tesla Model S colisionó contra el remolque arrancado el techo y así mismo falleciendo el ocupante del Tesla. Ni los propios técnicos de Tesla ni las autoridades saben a ciencia cierta cuál fue el fallo en el sistema que pudo ocasionar el accidente, pero sí especulan que la parte del camión

al ser de color blanco o que con el reflejo de la luz del sol la hiciera brillante, los sensores y cámaras del vehículo no detectasen el obstáculo.

Esta desgracia provocó un debate sobre estos automóviles, así como algunos problemas técnicos en el avance de este proyecto. [9]

2.1.2. Por mar

El concepto de buque sin tripulación o buque autónomo no es una idea tan reciente ya que en el año 1973, el escritor alemán Rolf Schonknecht, en su libro *Buques y transporte del mañana*, exponía la posibilidad de un futuro con buques en los cuales los capitanes desempeñarían sus labores desde tierra, mientras que a bordo solo habría ordenadores que se ocuparían de la travesía del buque. [1]

Mientras, en los años 80 del siglo XX, en Japón se empezó a discutir la posibilidad del desarrollo de buques autónomos operados sin tripulación. Pero esta idea comenzó a perder fuerza cuando las navieras empezaron a contratar tripulación *low cost*.

Seguidamente, en el 1990, el conocido diseñador de buques Kai Levander, padre del vicepresidente de innovación tecnológica de Rolls-Royce, Oskar Levander, demostró que un buque podía navegar distancias pequeñas sin necesidad de tripulación con la utilización de dispositivos GPS dirigidos por estaciones de tráfico marítimo y apoyados por prácticos en los últimos tramos. Por esta época también el arquitecto naval Volker Bertram propuso que una combinación de inteligencia artificial y teleoperación podría admitir la navegación de buques sin tripulación. Estas propuestas no progresaron ya que los costes de instalación y mantenimiento eran muy elevados para las agencias navieras.

En el año 2007, nuevamente esta iniciativa sale a flote, gracias a un estudio preparado por un grupo europeo sobre el desarrollo de la industria náutica. Este estudio exponía la posibilidad de una automatización más avanzada y con sensores mejorados pero no llegaba a proponer una automatización completa.

Después de unos cinco años, y gracias a este último estudio, grupos europeos de investigación comenzaron un proyecto colaborativo llamado MUNIN³ que tenía como propósito el desarrollo de un concepto posible de buque mercante no tripulado. La investigación abarcaba la navegación autónoma, comunicaciones y conectividad costera, propulsión y maquinaria

³ *Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks* - Navegación marítima no tripulada a través de la inteligencia en redes.

automatizada, sistemas de redundancia y eficiencia, así como un grupo de estudio del rango legal.

El proyecto MUNIN terminó con la idea de que la aplicación de los buques autónomos puede y será aplicado en ciertos lugares y bajo condiciones que permitan una operación más económica y segura. En relación con la conectividad se instauró que en ciertos lugares el ancho de banda satelital es limitado y los costes de comunicación son muy elevados, haciendo que la solución de control remoto no sea atractiva. Este estudio se finalizó diciendo que la implementación de esta idea era mejor aplicarla en buques nuevos y no adaptarla a los buques ya existentes, así como las funciones control de la nave y de vigilancia sería mejor ejecutarlas por un operario desde el centro de control en tierra.

Los buques sin tripulación controlados remotamente estarán muy pronto en los mares navegando ya que esta propuesta ya se está estudiando, así como los pros y los contras, cómo afectará a la normativa actual y a las leyes existentes.

Varias instituciones gubernamentales del mundo están investigando la posibilidad de los buques autónomos o sin tripulación. Dichos estudios o proyectos de investigación y desarrollo se realizan en conjunto con universidades.

Varias firmas comerciales de la investigación y desarrollo de sistemas náuticos han sacado a la luz sus prototipos de buques mercantes no tripulados.

Como consecuencia de los adelantos de la ciencia, este proyecto ocasionará una pérdida de puestos de trabajo a bordo de los buques pero un aumento de trabajo a la hora del diseño del buque y del control del mismo a la hora de la navegación. [10]

2.2. Estudios ya realizados o activos sobre los buques autónomos

Como todos los estudios que se realizan en los diferentes sectores, el objetivo principal es la mejora o la innovación en un cierto ámbito y esto causa una repercusión global.

El transporte marítimo mueve grandes cantidades de material diariamente, es decir, grandes cantidades de dinero anualmente. Es por esto que el mínimo cambio en el sector del transporte marítimo puede afectar a muchos intereses comerciales.

Muchas compañías y sociedades de clasificación compiten diariamente con el objetivo de mejorar el transporte marítimo a la hora de la reducción de emisiones de gases producidos por la combustión de los hidrocarburos y por la reducción de los accidentes marítimos y sus consecuencias. Para conseguir estas reducciones se quiere implementar la navegación autónoma, sin tripulación.

A continuación, se presentan algunos de los proyectos ya desarrollados o en desarrollo sobre la navegación de los buques autónomos. [11]

A) Maritime Unmanned Navigation Though Intelligence Network (MUNIN)

El proyecto MUNIN [12][13], traducido como navegación marítima no tripulada a través de la red de inteligencia, nació en 2012 y terminó en 2015 fue creado por la Comisión Europea con el objetivo de analizar la posibilidad de desarrollar y verificar la viabilidad técnica, legal y económica del concepto de buque autónomo. El núcleo de concepto es un buque que está completamente sin tripulación, al menos durante partes del viaje.

Los buques no tripulados y autónomos pueden contribuir al objetivo de una industria europea del transporte marítimo más sostenible, ya que tiene el potencial de reducir los gastos operativos, reducir el impacto medioambiental y atraer a profesionales del mar.

MUNIN, al buque autónomo, lo define como un barco guiado principalmente por sistemas de control modular y tecnología de comunicación que permite el monitoreo y control inalámbricos, incluidos los sistemas avanzados de soporte de decisiones automáticas pero controlado por un operador remotamente desde una estación de control terrestre al lado de la costa.

MUNIN ha diseñado una navegación en la que hay una tripulación mínima para el atraque y desatraque del buque y una navegación autónoma total sin tripulación.

Para este tipo de operación, MUNIN define diferentes sistemas como:

- Un módulo de sensores avanzado, que se encarga de las tareas de vigilancia a bordo del barco mediante la anteposición de imágenes durante el día y mediante cámaras infrarrojas durante la noche y la fusión continua de los datos del sensor de los sistemas de navegación existentes como el radar y el

AIS (Automatic Identification System, traducido al español, Sistema de Identificación Automática)

- Un sistema de navegación autónomo, que sigue un plan de viaje predefinido dentro de ciertos grados de libertad para ajustar la ruta de acuerdo con la legislación y una navegación marítima autónoma óptima, por ejemplo debido a un encuentro con un obstáculo o cambio de la climatología.
- Un sistema de control de monitoreo que enriquece los sistemas de automatización de la sala de máquinas y la propulsión del buque con funciones avanzadas que mantiene la eficiencia óptima.
- Una estación de control terrestre que monitorea y controla continuamente el buque operado de forma autónoma después de que el equipo de a bordo está compuesto por oficiales e ingenieros náuticos capacitados.

Este proyecto tiene como conclusiones las siguientes:

- Los buques autónomos deberán controlarse por los sistemas de navegación a bordo pero siempre bajo la inspección de un operario desde la estación de control terrestre.
- Los buques autónomos han de tener la capacidad de minimizar los riesgos de colisión y cumplir la normativa COLREG (*International Regulations for Preventing Collisions at Sea*).
- Los sensores empleados para las operaciones de navegación y de seguridad tienen que permanecer disponibles para utilizarse en operaciones búsqueda y rescate.
- Este sistema es viable en diferentes sentidos y podría ser más seguro que el actual ya que muchos de los fallos son de factor humano y estos fallos serían cubiertos por los sistemas tecnológicos.

B) *Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA)*

La iniciativa de aplicaciones avanzadas para la navegación autónoma (AAWA) [14], fundado en 2015 por Rolls-Royce, es un proyecto de 6.6 millones financiado por Tekes (*Agencia Finlandesa de Financiamiento para Tecnología e Innovación*) que tiene como objetivo la agrupación de universidades, ingenieros, investigadores y sociedades de clasificación para deliberar sobre la eficiencia de los buques autónomos.

Esta iniciativa determinó que con la tecnología implantada actualmente en los buques se podría poner a funcionar el sistema de navegación autónoma pero que habría un pequeño problema con la integración de los buques autónomos.

Dicho esto se llegó a la conclusión que hay tres temas que hay que tratar con delicadeza a la hora de la implementación de estos buques:

- La seguridad del propio buque como la de las operaciones que efectúa el mismo.
- La legislación.
- Ganarse la confianza de los armadores para que se contrate este sistema de transporte autónomo de mercancías.

C) Yara International Noruega

Yara Birkeland es el primer buque portacontenedores eléctrico, autónomo y sin emisiones. Según el artículo de Matía S. Zavia [15], el Yara tenía previsto zarpar en 2018. Pero en la sección de noticias de Yara, Yara Birkeland estará listo para su lanzamiento en 2020 y pasará gradualmente de la operación tripulada a la operación totalmente autónoma para el año 2022. [16]

Yara International Asa es una empresa noruega de fertilizantes que está trabajando en la creación del primer buque autónomo con propulsión eléctrica para transportar fertilizantes por el Báltico con la tecnología marítima Kongsberg.

El nombre del buque es Yara Birkeland por el fundador de Yara, el famoso científico Kristian Birkeland y transportará productos químicos y fertilizantes de Porsgrunn a las ciudades de Brevik y Larvik.



Figura 2. Ruta a seguir por el Yara [18]

Este buque tendrá cero emisiones de residuos de la combustión de hidrocarburos ya que la propulsión será eléctrica y se construirá en los astilleros de Kongsberg Gruppen ASA. Para este astillero, la construcción del buque le proporcionará el estudio del comportamiento de un buque propulsado eléctricamente pudiendo así ahorrar en las emisiones de sulfuro y otros componentes contaminantes provenientes de la combustión de los combustibles que se utilizan actualmente en los buques.[17]



Figura 3. Estructura del Yara [19]

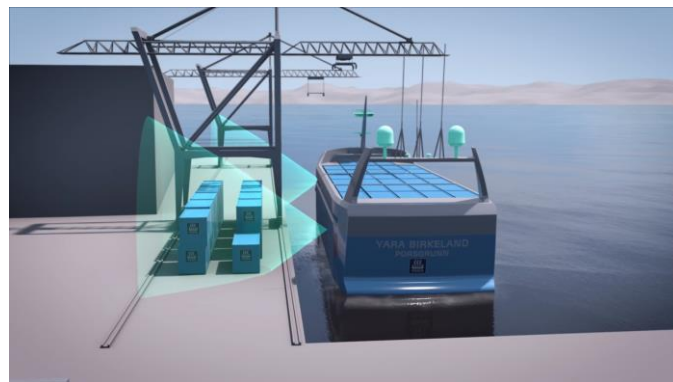


Figura 4. Desamarre y salida de puerto [19]

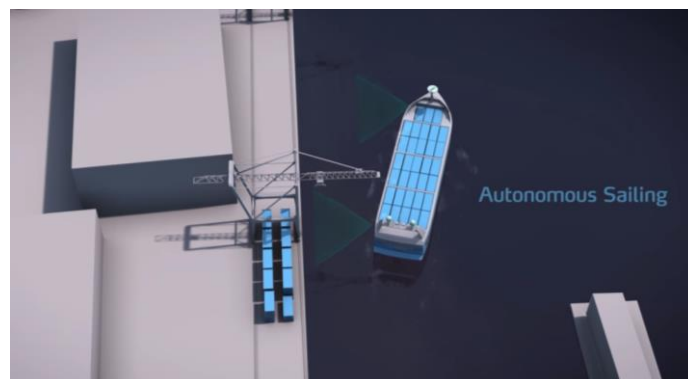


Figura 5. Navegación autónoma [19]

La primera prueba en alta mar tripulada se hizo a finales de 2018, así como la operación remota en 2019 y está previsto ceder el control total al propio buque en 2020.[19]

Yara exporta 20000 contenedores a los mercados internacionales de Herøya (Porsgrunn, Noruega). Yara International ASA afirma que el nuevo buque reemplazará a unos 40.000 viajes de camión al año por Noruega con el resultado de mejorar la seguridad vial y eliminar las emisiones de gases contaminantes. La solución para esto es la implementación de baterías para que sea 100% eléctrico y libre de lastre para el medio marino.

El presupuesto de inversión para el Yara asciende entre 25 y 30 millones de euros que es prácticamente el triple que las inversiones de buques de este tipo. No obstante, con el buque en pleno funcionamiento, sin tripulación, los costes se verán tan reducidos que se podrá recuperar la inversión inicial. [20]

D) ReVolt de DNV GL

Det Norske Veritas Germanischer Lloyd es una de las sociedades de clasificación más importantes que está investigando la posibilidad de establecer una normativa para la clasificación de los buques sin tripulación.

El proyecto ReVolt [21], [22], [23], [24] se inició como un proyecto de investigación en agosto de 2013 y se lanzó externamente un año después.



Figura 6. Buque autónomo ReVolt [22]

DNV GL se fusiona con la universidad de ciencia y tecnología de noruega en Trondheim para llevar a cabo unas pruebas con una maqueta a escala (1:20) de un buque autónomo.

La embarcación tiene una eslora de 60 metros y está alimentada con baterías y es completamente autónoma y con cero emisiones. Esta podría ser la solución para el transporte

en recorridos cortos. El buque operará con una velocidad de 6 nudos con un alcance de 100 millas náuticas y una capacidad de 100 contenedores de 20 pies.

Sin tripulación no necesitamos las instalaciones para la tripulación, es decir, que aumenta la capacidad de carga y disminuye los costes de operación y mantenimiento. Con esto se llega a la conclusión que podríamos tener un ahorro de unos 34 millones de dólares durante la vida útil del buque que se estima en unos 30 años, ahorrando más de un millón de dólares al año.

ReVolt es una visión para el futuro y no se construirá hasta que varias de las tecnologías involucradas hayan madurado. Sin embargo, posiblemente podría construirse y operarse utilizando la tecnología actual. Su objetivo es servir de inspiración para los fabricantes de equipos, astilleros y armadores en su esfuerzo por desarrollar nuevas soluciones para un futuro más seguro y más sostenible.

El gobierno de Noruega ha reservado una extensa área de las aguas de fiordo de Trondheim para utilizarlas como zona de pruebas de navegación de los buques autónomos con la aprobación de la NCA (Autoridad Costera de Noruega).

E) Cyber-enabled Ships de Lloyd's Register

Lloyd's Register es una de las sociedades de clasificación más importantes y competentes hasta el día de hoy, fundada en el año 1760. Este éxito se lo ha ganado a partir de la involucración en la renovación de las tecnologías. Dicha sociedad de clasificación redactó una guía en febrero de 2016 sobre la implementación de las nuevas tecnologías en el transporte marítimo, así como los riesgos tras la implementación de estas tecnologías.

Lo que quiere determinar Lloyd's Register con esta guía es que el buque sea lo más seguro posible teniendo en cuenta los riesgos desde y hacia el buque, sus sistemas, los operados (tanto a bordo como los operarios en tierra) y la filosofía operativa [25]. Por eso es necesario mitigar estos riesgos para que el nivel de riesgo sea aceptable en comparación con los de un buque convencional. Los seis riesgos a considerar son los siguientes:

- El sistema en general. Problemas eléctricos o mecánicos
- El factor humano. Las personas han de ser capaces de desempeñar correctamente su labor.
- Red y comunicaciones. Mantenimiento y rapidez en la transferencia de datos.
- *Software*. Fallos en el *software*.
- Garantía de datos. Si los datos adquiridos son fiables o no.

- Seguridad cibernética. Hackers.

F) Rolls Royce en Finlandia

Rolls Royce es actualmente una de las firmas líderes en la investigación y el desarrollo de buques autónomos y controlados remotamente con el objetivo de tener operando uno de estos buques en 2020. [26][27]

Rolls Royce abrió un centro de I+D para buques autónomos con contrato con la Agencia Finlandesa de Financiación de Innovación con base en Turku, Finlandia, con el objetivo de que la compañía y sus socios puedan desarrollar las nuevas tecnologías autónomas del mundo marítimo. Este centro comenzó a funcionar en 2017 e incluye un salón Espacio de experiencias de buques autónomos y remotos destinado a la demostración de las nuevas tecnologías introducidas por Rolls Royce, así como las que aún están en etapa de desarrollo.

Este también permitirá el estudio de proyectos de navegación autónoma, centros de control en tierra y la utilización de inteligencia artificial en operaciones de transporte marítimo remoto y autónomo. [29]



Figura 7. Buque autónomo Rolls Royce [28]

G) Intel y Rolls-Royce asociados en el desarrollo de buques autónomos



Figura 8. Estación de control terrestre [31]

Intel y Rolls-Royce anunciaron en octubre de 2018 un nuevo acuerdo con el fin de desarrollar y elaborar nuevos sistemas que ayuden a que los buques autónomos sean reales en un futuro.

Rolls-Royce lleva trabajando en el desarrollo de esta tecnología desde principios de 2010. En 2017 anunció que podría lanzar su primer buque autónomo en 2020. Esta empresa instalará en los buques autónomos la tecnología de la empresa Intel para generar una navegación más segura y con una tecnología más avanzada, utilizando para ello unos servidores basados en los procesadores Intel Xeon Scalable, centros de datos flotantes que tienen una gran capacidad de cálculo e IA, y un almacenamiento en unidades Intel 3D NAND SSD. Este sistema, ya desarrollado y llamado *Intelligent Awareness System*, recibirá la información de los distintos sensores, radares, cámaras, pronóstico meteorológicos y dispositivos LIDAR (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*) y la procesará para saber cómo es su entorno y que rodea al buque autónomo.

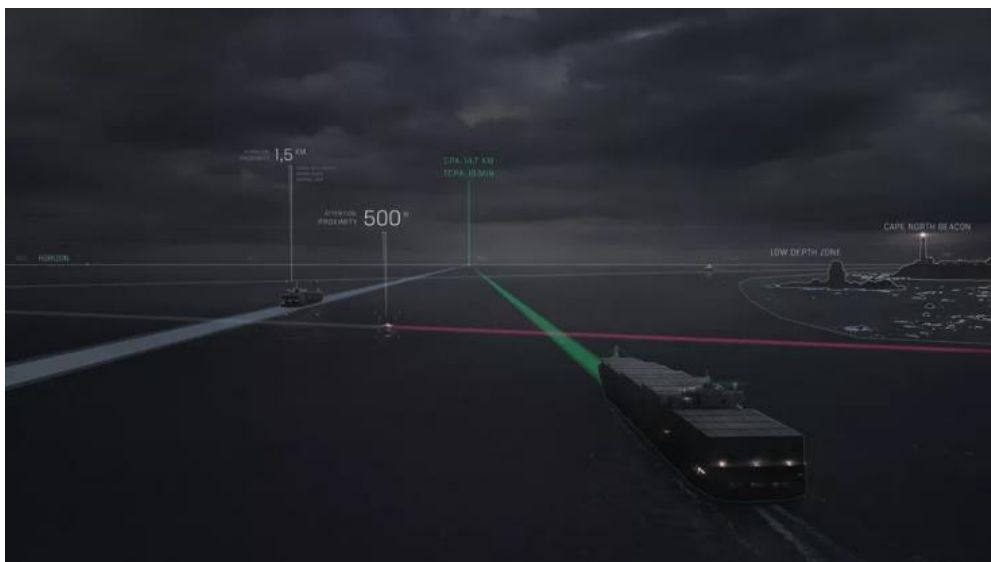


Figura 9. Detección del entorno de un buque autónomo [30]

H) Autoridad Marítima Danesa

La Autoridad Marítima Danesa (DMA) recomienda en un informe que se regularice a nivel internacional la implementación de los buques autónomos. [32]

Brian Mikkelsen, ministro de Industria, Negocios y Asuntos Financieros de Dinamarca, afirma que el desarrollo de buques autónomos evoluciona rápidamente y debemos estar preparados ya que la actual regulación se centra en la navegación tradicional a vela.

La Autoridad Marítima Danesa encargó a la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) que determinara cuáles son los progresos tecnológicos de importancia que han de ser estudiados para llevar a cabo la automatización de los buques.

Dicho estudio se centra en las explicaciones y los pasos a seguir para que las operaciones manuales de un buque pasen a ser completamente automáticas.

Los buques actuales llevan unos instrumentos electrónicos de navegación que avisan la posición del buque, la distancia a otras naves, el pronóstico de ruta, que en conjunto se ubican sobre las cartas electrónicas. Dichos instrumentos son el AIS (*Automatic Identification System*), el radar (**R**adio **D**etection **A**nd **R**anging), el GPS (*Global Positioning System*) y el ARPA (*Automatic Radar Plotting Aid* o *Radar de Punteo Automático*). En puente siempre ha de haber una persona de vigilancia a la hora de la navegación del buque y en otros casos una segunda persona que vigile el tránsito de otros buques.

Los buques tienen establecida una ruta sobre la carta de navegación interpretada por el piloto automático. El control manual solo se utiliza en caso de error en la ruta, obstáculos o maniobras.

Este estudio expone que para algunos buques la autonomía total no será la solución más económica y que habrá una etapa de cambio paulatino de los buques actuales a los buques autónomos.

También se menciona la importancia de los sistemas de comunicación con el manejo del buque sin tripulación en relación con accesos no autorizados y los ataques cibernéticos, ya que estos riesgos se tienen que tener en cuenta a la hora del diseño de los sistemas de comunicación y de navegación.

Para que el estado de Dinamarca pueda ser líder en buques autónomos primero ha de identificar los tipos de buques en los que en el futuro tengan una gran demanda de nueva capacidad de carga o adecuación de la capacidad de carga sea rentable en términos económicos y objetivos. A la hora de la creación de los buques autónomos esto debería implementarse en todos los estados ya que sería un beneficio económico y medioambiental a nivel global.

Los buques que abarcan estas características y que son los adecuados para que operen sin tripulación ya que tendrán la posibilidad de combinar propulsión eléctrica con autonomía, reduciendo así la tripulación, son los siguientes:

- Ferrys: importante para la población de las islas. Estos pertenecen al Estado de Dinamarca así que les interesa para reducir costes.
- Remolcadores
- Barcazas
- Buques de soporte en la explotación y exploración de hidrocarburos en el mar
- Buques para inspecciones subacuáticas de instalaciones petrolíferas en alta mar

I) Robert Allan remolcador RAMora.

Este proyecto de desarrollo e investigación de Robert Allan ha durado más de un año con el objetivo de diseñar un remolcador, el RAMora, para la asistencia de buques y operaciones de

atraques. Este remolcador cuenta con un sistema de propulsión híbrido y una gran capacidad de almacenaje de baterías para un uso prolongado incluso en ambientes peligrosos, como podrían ser las terminales de LNG (*Liquefied Natural Gas*) o extinciones de incendios. [33]

El timón de RAmora se puede accionar de forma remota el cual incluye video in situ con ángulo de 360 grados para tener una perspectiva continua a bordo para un manejo seguro y eficaz. Este sistema de control a tiempo real ofrece una interfaz al operario, así como los controles de maniobra y posición a bordo del buque, la supervisión de equipos y espacio de trabajo.

Este sistema de control lo ha desarrollado con la colaboración de la Ingeniería Submarina Internacional de Port Coquitlam en Canadá.



Figura 10. RAmora [33]

J) Hrönn, el buque autónomo de BOURBON

Bourbon ha desarrollado el primer buque autónomo petrolero junto a Automated Ships Ltd. Estos han firmado un memorándum de entendimiento (MOU) para llevar a cabo este proyecto Hrönn junto con la firma Kongsberg. [34]

Se trata de un buque con monocasco de acero para una mayor capacidad útil y una mayor flexibilidad para las operaciones. Este buque también servirá para casos de emergencia, como incendios, trabajando de forma cooperativa con buques tripulados.

Las pruebas de este proyecto se llevarán a cabo en la zona de pruebas destinada a los buques autónomos en el fiordo Trondheim bajo la normativa de DNV GL y la Autoridad Marítima Noruega (NMA).



Figura 11. Hrönn [35]

K) Gobierno de China y Universidad de Wuhan

La *Maritime Safety Administration* (MSA) de China tiene la aprobación de *Acceptance Expert Group* de su país para continuar con el proyecto de los buques autónomos. [36]

El “*Unmanned Multifunctional Maritime Ships Research and Development Project*”, es decir, el “Proyecto de investigación de desarrollo de naves multifuncionales no tripuladas” se empezó a desarrollar en 2012 y lo han llevado a cabo la unidad d gestión de proyectos de Zhejiang MSA conjuntamente con la Universidad Tecnológica de Wuhan.

A los 3 años este proyecto finalizó y tiene 4 patentes nacionales.

Dicho proyecto se enfoca en el desarrollo de la supervisión marítima interrumpida, ruta y rescate inteligente, cobertura controlada multipunto enfocada en la detección tierra-nave y una plataforma de vigilancia que guíe ciertos buques sin tripulación y buques de rescate, con unos bajos costes y una mayor eficiencia en cada ruta y mayor capacidad.

MSA declara que este sistema de buques se podría implementar en pesca de altura, defensa de fronteras, buques militares, monitoreo de las condiciones meteorológicas, etc.

Capítulo 3. Pros y contras de los buques autónomos.

En este capítulo se analizan los pros y contras más importantes de la implementación de la navegación autónoma. Como siempre que aparece una nueva tecnología, existen defensores y detractores sobre la aplicación y el desarrollo de los buques autónomos.

A continuación, se verán una serie de pros y contra sobre este tema.

3.1. Pros

- **Disminución de los accidentes**

En 2016 se registraron 2611 accidentes dejando decenas de muertos y otros tantos heridos [1]. Aun así, con la evolución tecnológica implantada hasta ahora, siguen sucediendo accidentes marítimos.

La causa de más del 80% de los accidentes ocurrido a bordo de los buques y de las colisiones entre ellos es el elemento humano. A raíz de estos datos, la comunidad marítima mundial ha investigado en la implementación de nuevas medidas que proporcionen una mayor seguridad, una mayor eficiencia en el transporte y la reducción de accidentes. Para llegar a este objetivo, se busca la tendencia de implementar la e-Navegación, la implementación de buques inteligentes y autónomos, sin tripulación.

- **Disminución en los costes de operación**

Moore Stephens LLP señala que el coste diario de la tripulación de un buque porta contenedores es el 44% de los costes operacionales de este tipo de buques. En este coste no solo constan los salarios, sino también la habitabilidad de los tripulantes, los sistemas de aire acondicionado, el puente de mando y otros servicios que ocupan peso y espacio del buque válidos para la carga. Todo lo nombrado anteriormente no solo genera un problema económico sino también medioambiental porque todo este peso muerto del buque genera alrededor del 2,5% de las emisiones de gases de efecto invernadero que emite el buque. [37]

Si a esto le aplicamos la ausencia de la infraestructura destinada a la habitabilidad y los servicios de tipo hotel, tendremos una mayor capacidad para la carga. Ciertas compañías dicen que los buques autónomos pueden llegar a ser un 5% más ligero y podrían llegar a utilizar entre un 12 y un 15% menos de combustible. Dicho lo anterior, la implementación de los

buques autónomos supondría una disminución del coste de los fletes y una disminución del coste final en el mercado de los productos.

- **Evolución en la tendencia tecnológica**

Oskar Levanter, vicepresidente de innovación de Rolls Royce, afirma que la tendencia tecnológica se dirige hacia la automatización de procesos, la retirada de las tripulaciones y los operadores y la aplicación de la tecnología remota, como en los casos de drones o vehículos autónomos. Levanter afirma que a día de hoy la tecnología se encuentra en el nivel adecuado para que esto se lleve a cabo y la sociedad está encarrilada en esa dirección así que, si se aplica en el ámbito marítimo, es el momento.

- **Iniciativa y apoyo estatal**

Como ya hemos visto anteriormente, algunos estados y organizaciones ya están involucrados en el estudio y el análisis de la implementación de los buques autónomos a la necesidad de sus operaciones estatales. La Unión Europea destinó 3.5 millones de Euros para la financiación del proyecto MUNIN, el cual investiga los costes y los beneficios de los buques sin tripulación. Este proyecto está liderado por Hans-Christoph Burmeister del centro de investigación para servicios y logística marina Fraunhofer en Hamburgo.

- **Supresión de la piratería**

El aumento de la piratería nos indica que las tripulaciones siguen siendo objetivos débiles y valiosos para los criminales internacionales, los cuales piden recompensas importantes lo que conlleva un aumento de los costes en el sector marítimo.

Estos buques, al ser sin tripulación, permitirían llegar a la supresión de la piratería, ya que este tipo de agresores no podrían secuestrar a nadie ni llevar a cabo el cobro de recompensas. Dichos buques, al no tener tripulación, tendrían un diseño muy diferente a los tripulados, así que esto dificultaría la entrada a personal externo del buque. Al detectarse este tipo de abordajes, el propio buque podría disponer de un sistema de seguridad a bordo o incluso un sistema que impidiese el rapto del buque y la utilización como buque fantasma.

3.2. Contras

- **Ataques cibernéticos**

Los ataques cibernéticos son una desventaja para los buques autónomos ya que se tendrían que encriptar y poner claves a todos los dispositivos y software del buque para que ninguna

persona sin autorización para controlar el buque pudiera hacerlo. Cada vez los hackers son más profesionales y tiene más medios para apoderarse de cualquier programa o software, así que podrían fácilmente colarse en el sistema del buque haciendo cambiar de rumbo o incluso secuestrándolo.

- **Desarrollo de algunas maniobras**

A día de hoy, en los buques actuales, las maniobras las hace el primer oficial. En los buques autónomos hay ciertas maniobras que serían difíciles de desarrollar ya que solo se podrían desarrollar remotamente desde la estación de control terrestre. Por ejemplo; si nos encontramos en la situación de un temporal y el buque atraviesa una zona con olas de una cierta altura, el buque tendría que coger las olas por la proa y sobretodo no cogerlas perpendicular al buque ya que tendríamos pantocazos. Esto al hacerlo una persona dentro del buque es más fácil ya que ve por donde vienen las olas y puede accionar rápidamente el timón, pero en un buque autónomo, tendríamos que disponer de cámaras y sensores para detectar de donde vienen las olas y el operario desde tierra poder manejar el buque remotamente.

- **Incidencias en la navegación.**

Podría pasar que el buque autónomo a través de los sensores no detectase otros buques o que los sensores dejaran de funcionar y que esto ocasionaría un abordaje u otro tipo de accidente. Así que aún no se sabe hasta qué punto estos buques podrían reducir el porcentaje de accidentes de los actuales y si las causas y las pérdidas en estos accidentes podrían ser mayores o menores.

- **Atraque y desatraque**

El atraque y desatraque de los buques es una de las maniobras más complicadas del buque. Para llevar a cabo esta maniobra se necesita prepararla para ejecutarla con seguridad. En esta maniobra intervienen diferentes figuras como:

- Capitanía marítima: responsable del registro, control y tráfico del puerto.
- Práctico: responsable de controlar y dirigir el buque cuando se encuentra cerca de la bocana del puerto hasta su atraque, y viceversa a la hora del desatraque.
- Remolcadores: embarcaciones pequeñas que escoltan y ayudan a desplazar el buque dentro del puerto con el objetivo de que el buque traque sin peligro. En buques más grandes pueden ser necesarios varios.

- Amarradores: responsables de recoger los cabos y llevarlos hasta el muelle para amarrarlos al noray.

En un buque autónomo, todo este personal no podría ejercer su trabajo, así que habría que buscar otras alternativas para ellos. Capitanía marítima no influye ya que es administrativo. La función del práctico se tendría que hacer a través de información enviada al buque a través de la estación de control terrestre. Los remolcadores tendrían que ser autónomos. Y a la hora del amarre o desamarre se necesitaría unos sistemas que fueran automáticos.

- **Disminución de puestos de trabajo**

Al aplicar las nuevas tecnologías en los distintos puestos de trabajo siempre hay una pérdida de personal ya que estos sistemas sustituyen a una gran cantidad del personal. En los buques autónomos, al navegar sin tripulación, todo el personal a bordo de los buques actuales se perdería. Una pequeña cantidad del personal se podría utilizar para los puestos de operario de la estación de control terrestre los cuales tendrían que partir una formación para adquirir todos los conocimientos.

- **Transformación del marco jurídico**

Según Simon Bennett de *International Chamber of Shipping*, los buques autónomos según los convenios internacionales son ilegales, ya que no se mencionan en ningún tipo de reglamentación. En el último comité de seguridad marítima (MSC), la OMI ha decidido exponer una serie de pruebas que aprueben que estos buques puedan ser integrados en los convenios internacionales. En diciembre de 2017 la autoridad marítima danesa recomendó el cambio de ciertas regulaciones de la OMI con el fin de permitir el desarrollo de los buques sin tripulación. Este informe de la autoridad marítima danesa expone las regulaciones sobre la dotación, descripción del capitán y la probabilidad de un puente sin tripulación y una vigilancia electrónica.

- **Opinión de los sindicatos**

La Federación Internacional de Trabajadores Portuarios, que abarca unas 600.000 personas, se opone a la decisión de la utilización de buques sin tripulación ya que se sienten amenazados con la utilización de este modelo de tecnología. Dave Heindel, jefe de dicho sindicato, afirma que los ojos y oídos de los profesionales no pueden ser reemplazados ya que el elemento humano es la primera línea de defensa ante un fallo de maquinaria o condiciones inesperadas.

Los daños que puede ocasionar un buque autónomo son mucho más notables que los buques actuales.

Capítulo 4. Aspectos a considerar en la navegación de los buques autónomos

Durante la navegación de un buque hay diferentes aspectos que hay que tener en cuenta. Podemos encontrarnos con diferentes casos, es decir, con la fluencia de buques con distintas rutas, la presencia de un obstáculo en medio del mar, la detección de una isla, las diferentes situaciones medioambientales, ya sea viento, lluvia, etc. [38] Estas distintas situaciones, con un buque con tripulación a bordo serían bastante sencillas de solucionar. En los buques autónomos tenemos la desventaja de que no tenemos la presencia humana, por lo tanto, estas condiciones tendríamos que solucionarlas remotamente desde la estación de control terrestre.

En este capítulo podremos ver los aspectos más importantes que debemos considerar ante la navegación con un buque autónomo.

4.1. La detección del entorno

En la actualidad, la tripulación del buque, durante la ruta, puede observar lo que está sucediendo en su entorno y las condiciones que este impone. Con la visión podemos determinar la afluencia de tráfico marítimo, obstáculos, islas, etc. y poder dar soluciones instantáneas a cada problema.

Para poder navegar siguiendo la normativa COLREG (*Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, Convenio sobre el Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes* [42]), que detallaremos a continuación, y evitar posibles colisiones, debemos tener una vigilancia continua del entorno del buque. Toda esta información del entorno del buque debería procesarse inmediatamente y ante una situación de peligro, el sistema de navegación automática debería tomar las medidas óptimas para evitar una colisión.

Para evitar la colisión es fundamental saber la posición exacta, movimiento y comportamiento de la nave en la carta electrónica. Los objetos cercanos al buque están monitorizados con el fin de predecir su movimiento y así tener un pronóstico de su alcance.

La estación de control terrestre fija unos parámetros iniciales y una vez superados, el sistema de navegación automática actuará lo mejor posible incluyendo en su decisión la maniobrabilidad y visibilidad del buque. Estas acciones serán compartidas con la estación de control terrestre y la situación final será mostrada con una simulación para cada una de las

posibles maniobras. La estación de control terrestre es la que debe dar la aprobación a la maniobra más adecuada. El sistema de navegación automática tiene incorporada una función que le permite decidir de forma autónoma por si el operador de la estación de control terrestre no estuviera capacitado para tomar una decisión o no pudiera por otros motivos o que la decisión tomada por el propio sistema fuese la correcta. Si el sistema tomara su propia decisión, el operario solo debería supervisar la ejecución.

Si los otros buques no estuvieran cumpliendo la normativa COLREG, habría que notificar al centro de control terrestre ya que los parámetros de trabajo del sistema de navegación habrían cambiado. Estos parámetros se verían alterados ante un buque pesquero o un buque averiado, ya que el sistema de navegación automática lo detectaría como si fuese un obstáculo.

El buque ha de ser capaz de distinguir estas situaciones y por lo tanto se incorpora un módulo avanzado de sensores⁴. La información recogida por el módulo de sensores se une para crear una imagen virtual que nos informa de que pasa en cada momento alrededor del buque.

4.2. La climatología

Actualmente, los buques disponen de sistemas electrónicos, como podrían ser el pluviómetro, termómetro, barómetro, medidores de fuerza y dirección del viento, altura de las olas, humedad, etc., que siempre están en funcionamiento utilizados para medir las condiciones meteorológicas y detectar futuros cambios meteorológicos. Todas estas mediciones obtenidas a tiempo real se centralizan en el sistema que recoge los valores de los sensores, los superpone y los envía directamente al sistema de navegación para poder tomar decisiones según los datos recogidos.

El sistema de navegación autónoma es capaz de maniobrar la nave siguiendo los parámetros pautados inicialmente en el plan de viaje. Para que esta maniobra sea lo más eficiente posible se debe tener en cuenta el estado del buque y la organización de los datos que se requieren para dicha maniobra. Estos datos se pueden dividir en dos; los datos sobre el estado interno del buque, es decir, fuerzas y estado de la máquina; y los datos de la estabilidad y la

⁴ El sistema de módulo de sensores avanzado tiene como objetivo captar las condiciones externas y el tráfico enviando esta información al operario para que el buque tenga una navegación de forma segura. Es imprescindible para cumplir la normativa COLREG, disminuir el riesgo de colisión y dar seguridad a la hora de navegar. Cada sensor está limitado, por lo tanto tenemos un sistema de fusión de sensores el encargado de recoger la información del módulo de sensores avanzado y combinar los rangos más exactos de cada sensor. Está conectado al sistema de alarmas del buque activándose de forma automática si se sobrepasan los rangos fijados por el operario.

flotabilidad del buque. Estos datos se operan por separado y una vez resueltos los cálculos se puede establecer la forma en la que debe maniobrar el buque.

Si se encuentra con la situación de un cambio meteorológico, los diferentes instrumentos recogerán los datos y el sistema de navegación automática decidirá qué tipo de maniobra ha de hacer para contrarrestar estos cambios meteorológicos. Este cambio en la maniobra se comunicará a la estación de control terrestre donde el operario decidirá si es la correcta o no, o si puede haber otras maniobras más eficaces.

En estas situaciones podemos encontrarnos distintas maniobras posibles para diferentes cambios meteorológicos. Se podría dar el caso de que cambiara la dirección del viento y entonces tendríamos que corregir el ángulo de giro del timón o cambiar el tipo de conducción reduciendo así la velocidad o aumentándola.

4.3. Ruta a seguir

Antes de iniciar una navegación hay que elaborar un plan de ruta el cual lo elabora el oficial y lo supervisa el capitán. El plan de ruta deseada ha de tener un punto inicial y un punto final, así como una serie de puntos que ha de seguir. Este plan de ruta ha de tener un estudio de la ruta detallado, con una serie de *way points* y unas especificaciones del rumbo, la distancia a la costa, el ángulo de giro, velocidades, corrientes, fuerza del viento, etc.

Con estos datos el sistema de navegación autónoma es capaz de navegar con un diseño de ruta fijado y con los datos proporcionados inicialmente y los que se van recopilando gracias a los diferentes sensores.

En la actualidad se hacen unas guardias durante la navegación donde se ha de estar atento al entrono con diferentes medios. Los oficiales no solo elaboran la ruta y están atentos en la navegación sino que han de supervisar el funcionamiento correcto de los instrumentos de navegación, buen funcionamiento de alarmas y seguir las normativas de los convenios de la OMI.

En los buques autónomos, las funciones que hacía el oficial sobre la guardia de la navegación pasan a ser responsabilidad del módulo de sensores avanzado. Los datos recogidos se procesarán por separado y una vez procesados se juntarán en el sistema de navegación autónoma que será el que decidirá qué hacer con ellos.

Hay dos situaciones que el sistema de navegación autónomo no podrá ejecutar que son el desvío de la ruta original, ya que deberá ser aprobado por la estación de control terrestre, y las comunicaciones de radio que será entre estaciones.

4.4. Comportamiento de las olas

Durante la navegación, el buque puede encontrarse con unas condiciones meteorológicas adversas que generen olas gigantes o vagabundas que surgen de forma espontánea que se registran con los sensores y la radio boyas.

En la navegación actual con tripulación a bordo, el capitán o primer oficial puede ver por donde le vienen las olas y que hacer en ese momento. Ante un temporal de este tipo, hay que decidir entre enfrentarse al temporal o correr con él. Si decide enfrentarse, hay que ofrecerle la proa al oleaje y para reducir la intensidad de estos pantocazos⁵ lo mejor es evitar la navegación perpendicular a las olas y ofrecer la amura. Si decide correr el temporal, las olas tienen que llegar un poco por la aleta y no por popa. Para las dos decisiones hay que reducir la velocidad de navegación ya que tendremos un mayor control del buque.

En un buque autónomo, este caso es más difícil de controlar ya que no sabemos a ciencia cierta por donde nos vienen las olas. Para esto tendríamos que poner algún tipo de cámara o sensor que nos detectase por donde nos vienen las olas y de que altura son para que esta información nos llegue a la estación de control terrestre y el operario desde tierra pueda guiar al buque para que o se enfrente a las olas o corra el temporal.

4.5. Funciones desempeñadas por el oficial de puente

El los buques actuales, con tripulación, los oficiales de puente desempeñan distintas tareas [39]. El oficial de puente utiliza el equipo de navegación y es el encargado de mantener actualizada la bitácora de navegación⁶. También es el encargado de realizar las operaciones pertinentes a las cargas portuarias, así como la planificación y el inventario. Debe realizar el mantenimiento del equipo destinado para cargar y descargar las mercancías y la revisión del casco y el mantenimiento o reparaciones pertinentes, como mantener el buque limpio y organizado y verificar que los equipos salvavidas y contraincendios estén en regla.

⁵ Golpe que da el casco en el agua cuando choca contra las olas.

⁶ En la marina mercante, se conoce con el nombre de cuaderno de bitácora al libro en el que los marinos, en sus respectivas guardias.

Dicho esto, en los buques autónomos, al no disponer de oficial de puente, algunas de estas tareas no se podrían hacer a bordo ya que no se dispone de este cargo. Entonces deberíamos encontrar soluciones para cada una de las funciones que desempeña el oficial de máquinas. Las soluciones serían las siguientes:

- La utilización de los equipos de navegación sería autónoma y remota a través de los operarios de la estación de control terrestre.
- La actualización de la bitácora de navegación estaría a cargo del operario de la estación de control terrestre ya que es el encargado de las guardias del buque.
- La planificación y el inventario de las cargas deberían de realizarla los operarios portuarios, tal como el mantenimiento de los equipos destinados a la carga y descarga, la revisión del casco del buque y de los equipos salvavidas y contra incendios y la limpieza del buque.

4.6. Seguridad cibernética

La seguridad en las comunicaciones de los buques autónomos es muy importante para que los hackers no puedan acceder a los datos del buque y poder manipular todos los dispositivos de comunicación que están informatizados. La piratería podría causar serios problemas como el manejo del buque para desviarlo, el secuestro del propio buque o de la carga, la provocación de accidentes o el robo de los datos de la compañía. Debemos tener varios puntos en cuenta a la hora de prevenir el hackeo del sistema de navegación:

- Debemos tener todos los datos encriptados y verificados, sobre todo en las zonas cercanas a los puertos ya que hay mejor cobertura.
- Las soluciones para los fallos del buque también han de estar encriptados con un nivel inferior ya que están supervisadas por los operarios de la estación de control terrestre.
- El sistema debería de llevar un dispositivo de reinicio en caso de un ataque cibernéticos.

4.7. Sistema de tanques de lastre

El sistema de lastre permite a los buques reducir el esfuerzo en el casco, mejorar la propulsión y maniobrabilidad y una mayor inmersión y estabilidad mediante la carga de agua que se establece en unos tanques destinados para ello. Esta técnica consiste en el llenado total o parcial, con agua del entorno en el que esté en ese mismo instante, de los tanques que hay en

el interior del casco. También puede darse que el buque tenga que expulsar agua de los tanques de lastre.

No solo se hace lastrado y deslastrado a la hora de cargar o descargar el buque, sino que durante la navegación, el capitán o el primer oficial, decide lastrar o no mediante el ordenador ya que esto ayuda a la estabilidad del buque.

El lastre se distribuye a través de unas tuberías que atraviesan todo el buque, las cuales, mediante unas válvulas hidráulicas, dejan o no pasar el caudal de agua a los tanques de lastre para conseguir una mayor estabilidad del buque. El agua de lastre es impulsado por unas bombas que están ubicadas en la sala de máquinas.

Teniendo en cuenta la anterior explicación, en los buques autónomos, el sistema de tanques de lastre tendría que ser accionado automáticamente según el comportamiento del buque durante la navegación y supervisado siempre por el operario de la estación de control terrestre.

Capítulo 5. Nueva legislación de los buques autónomos.

Se podría decir que uno de los desafíos más grandes que tendríamos a la hora de la implementación de los buques mercantes sería a la hora de desarrollar y elaborar unas nuevas leyes que llegaran a un acuerdo todos los países que constituyen la OMI y, a más, acorde con las leyes ya establecidas y que continuarán aplicando en ciertos buques.

La legislación marítima comprende una suma cantidad de leyes y distintas herramientas legales que dirigen el mundo de las naves y sus distintas operaciones, acompañada de todas las reglas de uso territorial, nacional e internacional. Dichas leyes también comprenden algunos aspectos relacionados con el entorno civil, así como el medio ambiente, la seguridad marítima, salvamento marítimo, derechos jurídicos, etc.

Al mismo tiempo que la legislación marítima se acoge a las leyes territoriales, nacionales e internacionales dependiendo del sitio donde estemos navegando, la nave ha de cumplir la legislación marítima de la bandera, la cual defiende la experiencia profesional y la seguridad de cada tripulante que trabaje en la nave.

Para desarrollar la nueva legislación marítima correspondientes a los buques autónomos y que esta garantice las mismas o mejores normas de seguridad y protección marítima se debe seguir la legislación actual y transformarla teniendo en cuenta las nuevas adversidades.

5.1. SOLAS (*International Convention for the Safety of Life at Sea*)

El convenio SOLAS (*Safety of Life at Sea, Convenio Internacional Para la Seguridad de la vida humana en el mar*) [40] es el más importante internacionalmente con relación a la seguridad en los buques mercantes. Este convenio tiene como objetivo establecer normas de seguridad a la hora de la construcción, el equipo y la utilización de las naves y fue redactado por primera vez en 1914 como consecuencia del hundimiento del Titanic. La última versión del convenio SOLAS fue adoptada en 1974 y actualizada en varias veces. La versión actual del Convenio SOLAS dispone de un anexo dividido en 14 capítulos.

En el capítulo I es donde están las reglas relacionadas con los diferentes tipos de naves y con el control de los documentos que acreditan si el buque sigue las preinscripciones del Convenio.

En el capítulo II-1 se establecen las reglas relacionadas con la estructura del buque, la construcción, su compartimentado y la estabilidad, maquinas e instalaciones eléctricas del buque.

En el capítulo II-2 figuran medidas de seguridad contra incendios. Prevención, detección y extinción de incendios.

En el capítulo III se encuentran las reglas sobre los dispositivos y medios de salvamento que se encuentran en el buque, como puede ser un chaleco salvavidas, bote de rescate, etc.

Hasta este punto podríamos decir que en el capítulo I se debería incorporar los buques autónomos y sus diferentes tipos. En las dos partes del capítulo II podríamos añadir que en caso de emergencia, de alarma y operaciones a bordo se realizarían desde tierra remotamente. El capítulo III que está relacionado con los dispositivos se podría suprimir ya que en los buques autónomos no tendríamos tripulación.

En el capítulo IV se habla de las radiocomunicaciones incorporando el sistema mundial de socorro y seguridad marítimo (SMSSM) en caso de accidente. Para que en los buques sin tripulación esto se pueda cumplir, se deberá ampliar la normativa pudiendo controlar el buque ya sea desde el propio puente o desde la estación de control terrestre.

En el capítulo V se habla sobre la seguridad marítima en la navegación como el mantenimiento de los servicios meteorológicos, el servicio de vigilancia de hielos, organización del tráfico, etc. Este es uno de los capítulos más difíciles que encontramos en el SOLAS a la hora de transformarlo a los buques autónomos ya que se incluyen normas muy detalladas sobre cómo hay que actuar en el buque a la hora de tomar decisiones y de la estrategia de trabajo en los apartados de plan de ruta, gobierno del buque, requisitos en las guardias navegando o embarque de un práctico. En este capítulo entonces deberíamos ampliar el concepto de gobierno de la nave y la extensión de la cobertura de los nuevos sistemas de navegación autónoma y del sistema de que toma decisiones, adaptando uno al otro para que cumplan con las normas de seguridad. También se han de supervisar las decisiones que se tomen en la estación de control terrestre.

Los capítulos VI, VII y VIII hablan del transporte de cargas, tipos de cargas, transporte de mercancías peligrosas y su clasificación y de los buques nucleares.

El capítulo IX incluye el código IGS, Código internacional de gestión de seguridad, donde dice que el propietario del buque o persona que asuma la responsabilidad del buque ha de establecer un sistema de gestión de seguridad. En este caso se relaciona a la naviera con el mando del buque, pero para los buques autónomos habría que relacionar a la naviera con el puesto de control en tierra.

En los capítulos X y XII se habla de las medidas de seguridad aplicadas a buques de gran velocidad y a los graneleros respectivamente.

5.2. MARPOL (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*)

El convenio MARPOL (*Marine Pollution*) es el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques ya sea por la causa de factores de funcionamiento o accidentales [41]. Este convenio fue adoptado el 2 de noviembre de 1973 por la OMI.

En este convenio están establecidas normas de prevención y reducción de la contaminación producida por los buques accidentalmente o procedentes de las operaciones de los buques. Incluye seis anexos donde se habla de la estructura de buques, equipamiento, procedimientos de carga y descarga con seguridad, *bunkering*, actuación ante un derrame, etc.

Para los buques autónomos hay que decir que este convenio no necesitaría ningún tipo de cambio ya que la prevención contra la contaminación por los buques hay que cumplirla. Sí que es verdad que a la hora de responsabilidades en las acciones sí que tendríamos que modificar la normativa.

La responsabilidad de estas acciones podría ser adjudicada a los operarios en tierra, así como de la alarma de rebose de tanques o del mantenimiento de las instalaciones SOPEP. El sistema autónomo tendría que estar obligado a monitorizar de las condiciones de las cargas a lo largo de la carga y descarga y a lo largo de la ruta, así como la gestión de las notificaciones de alarma enviadas a la estación de control terrestre para formular una actuación lo antes posible.

Pongámonos delante de una situación de derrame. Por mucho que la coordinación en tierra sea lo más rápida posible, ante este tipo de accidentes, la acción humana a bordo sería la más rápida ya que ante un derrame en cubierta, la tripulación podría utilizar otro medio como

trapos, cubos, secantes, espiches, etc., para que los daños sean mínimos. En cambio, los sistemas autónomos están limitados a la hora de este tipo de acciones.

Para asegurarse de que esto no ocurra, de que no haya derrames, hay que enfocarse en cómo debería ser la nueva estructura del buque y en los tanques para que ningún tipo de producto contaminante pueda caer al mar pero que tampoco esta estructura pueda causar daños a la propia estructura del buque.

5.3. COLREG (*International Regulations for Preventing Collisions at Sea*)

El COLREG [42] es un Convenio sobre el Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes adoptado en 1972 y entró en vigor en 1977. Este convenio recoge una serie de normas para que se pueda establecer una circulación ordenada en el mar. Contiene 41 reglas divididas en cinco partes. Incluye reglas como la determinación de la velocidad de seguridad de un buque, los riesgos de abordaje, señalización del propio buque y marítima, luces y marcas, señales acústicas y luminosas y prioridad de maniobra.

Para los buques autónomos también se deben aplicar estas normas y en caso de las normas referidas a la tripulación a bordo del buque y las tareas de vigilancia, estas habría que proporcionar dichas responsabilidades a los sistemas de navegación autónoma y la estación de control terrestre.

En la parte B del convenio que trata del rumbo y del gobierno, en la regla 5 se establece textualmente que "todos los buques mantendrán en todo momento una eficaz vigilancia visual y auditiva, utilizando así mismo todos los medios disponibles que sean apropiados a las circunstancias y condiciones del momento, para evaluar plenamente la situación y el riesgo de abordaje". Dicha norma trata de asegurar que los medios de vigilancia del entorno estén continuamente en funcionamiento sin necesidad de la acción humana, así que en el caso de que se requiera la acción humana para dicha vigilancia, las autoridades nacionales deberían traspasar esta acción a las máquinas y así poder cumplir este código.

Las normas destinadas a la maniobra del buque tendrían que estar programadas previamente en el sistema de navegación automática teniendo en cuenta los diferentes episodios ya registrados para que pueda mejorar la eficiencia en las maniobras, proporcionando seguridad desde tierra.

También habría que debatir la opción de cómo deberían estar señalizados los buques autónomos.

5.4. STCW (*International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers*)

El Convenio STCW [43] es el Convenio internacional en Estándares de Formación, Certificación y Vigilancia para la Gente de Mar adoptado en 1978 y entró en vigor en 1984. El objetivo primordial de este convenio es promover la seguridad de la vida de las personas que trabajan a bordo de la nave.

Los cursos y certificados STCW no solo son obligatorios para la tripulación de puente y sala de máquinas, sino que también lo son para azafatas, cocineros y otro tipo de personal en distintos buques. En el caso de los buques autónomos, esta normativa no se podría aplicar como tal ya que en los buques no habría ningún tripulante. Sí que es verdad que habría que estipular una formación mínima al personal que traba en la estación de control terrestre para que se garantice un trabajo óptimo, así como una formación en materia de navegación, en el campo de la informática y en telecomunicaciones ya que ellos serán los últimos responsables en la decisión que vaya a tomar el buque. A la hora de tomar ciertas decisiones hay que tener unas referencias de la situación y del espacio, por lo que el personal de la estación de control terrestre debería estar embarcado durante un período de tiempo para adquirir esa formación práctica de las labores de vigilancia del puente como la de máquinas.

El personal de tierra que trabaje en instalaciones portuarias también deberá disponer de un certificado STCW para llevar a cabo las labores del mantenimiento del buque.

El actual convenio STCW dice que los buques mercantes no se deben deshacer de toda su tripulación a la vez, sino que tiene que ser de forma gradual hasta que toda la flota se vaya renovando. Si no se efectuara este cambio gradual tendríamos el problema de que habría dos tipos de buques con dos normativas distintas que podrían causar conflictos entre tripulantes del buque convencional y personal en tierra de los buques autónomos.

5.5. MLC (*Maritime Labour Convention*)

El Convenio sobre el Trabajo Marítimo [44][45] fue aprobado por la Conferencia internacional del trabajo de la OIT en febrero de 2006, ratificado por el reino de España y entró en vigor en agosto de 2013.

Este convenio establece la obligación de que todos los buques incluyendo los buques de arqueo bruto igual o superior a 50 GT que efectúen travesías internacionales y de aqueo bruto igual o superior a 500 GT que enarboles el pabellón de un miembro y operen desde un puerto, entre puertos, de otros países, estén en posesión de un certificado de trabajo marítimo y una Declaración Laboral Marítima (parte 1, regla 5.1.3.)

Dicho convenio es el que utilizan los trabajadores marítimos para garantizar unos derechos dignos en las condiciones de vida, tiempo y opciones de embarque, dietas, contratos, condiciones a bordo y muchos más aspectos que garanticen unas buenas condiciones de vida de los trabajadores a bordo.

En el artículo II de este convenio se dice que esto solo es aplicable para los trabajadores que se encuentran a bordo de los buques. En cambio, en el artículo 3 podemos leer que se establece un proceso en el que se tienen en cuenta categorías de trabajadores relacionadas con el sector marítimo. Si hubiera algún tipo de duda sobre la categoría especial del trabajador pudiendo considerarlo como marino, sería responsabilidad de la autoridad competente junto con la naviera y las organizaciones de marinos mercantes, considerarlo o no como marino.

Por lo tanto, con esto llegamos a la conclusión de que un operador en tierra podría llegar a conseguir las mismas condiciones de trabajo que un marino mercante.

5.6. Código Lloyd's Register para buques autónomos

Lloyd's Register, en el año 2017, elaboró un *Código de diseño para sistemas marinos no tripulados* [46], en forma de borrador, para regular la navegación de los futuros buques autónomos.

Dicho código está formado por nueve capítulos y dos anexos que comentaremos a continuación.

- Capítulo 1: características generales. Resume las características generales, alcance y objetivos del código, su estructura y algunas definiciones y especificaciones de los materiales, integridad y operaciones que tienen

que han de cumplir los buques. Las primeras palabras textuales que se expone en este capítulo dicen lo siguiente “un buque no tripulado debe ser seguro, fiable, capaz y resistente en todas las condiciones durante sus operaciones”.

En la sección 3 de este capítulo dice que este código es aplicable a los vehículos autónomos y de control remoto que operen en la superficie, pero no para submarinos aunque estén vinculados a una nave nodriza.

- Capítulo 2: estructura. Define los requisitos de la estructura de los buques autónomos para obtener unas condiciones operativas del buque y condiciones de carga segura y fiable garantizando así una navegación óptima y segura respetando el medio ambiente. La estructura del buque autónomo debe ser diseñada, construida y mantenida con un nivel de integridad suficiente que permita realizar las operaciones de manera segura y cumpliendo las exigencias de seguridad.
- Capítulo 3: estabilidad. Se refiere a la provisión de flotabilidad, estabilidad, estanqueidad e integridad del buque autónomo en todas las condiciones meteorológicas garantizando una navegación segura.
- Capítulo 4: sistemas de control. Abarca todos los equipos y componentes de seguridad relacionados con el sistema de control y los peligros que estos pueden crear. También incluye los sistemas a bordo del buque autónomo y cualquier instalación que se encuentre en la estación de control terrestre o en las instalaciones portuarias que realicen la función de monitorización o control de los sistemas de propulsión, maniobra y navegación y la comunicación para llevar a cabo estas funciones. Excluye la supervisión y control de los sistemas auxiliares.
- Capítulo 5: sistemas eléctricos. Define todos los componentes y equipos relacionados con el sistema eléctrico y los peligros que estos pueden crear. Incluye los sistemas de generación, almacenamiento y distribución de corriente, incluido el suministro de energía eléctrica a los equipos portátiles, excluyendo los equipos portátiles en sí.

- Capítulo 6: sistemas de navegación. Describe los sistemas necesarios para la navegación segura del buque autónomo, incluyendo los sistemas a bordo y los de la estación de control terrestre para la identificación y evitación de riesgos durante la navegación y los medios de comunicación con otros buques para transmitir intenciones. Excluye al módulo de sensores avanzados ya que se incluiría en el capítulo 4.
- Capítulo 7: propulsión y maniobra. Abarca todos los equipos y componentes relacionados con el sistema de propulsión y maniobra y los peligros que estos puedan crear, como hélices, motores, etc. Excluye los medios auxiliares incluidos en el capítulo 9.
- Capítulo 8: fuego. Describe toda la estructura, equipos y componentes relacionados con la seguridad contra incendios. Incluye todos los sistemas fijos automatizados y operados a distancia, pero excluye los equipos de extinción o protección portátiles como los extintores o los ERA.
- Capítulo 9: sistemas auxiliares. Se recogen todos los equipos auxiliares y los componentes y sistemas que apoyan la activación de estos sistemas auxiliares. No incluye los sistemas de control, los sistemas eléctricos, los sistemas de navegación o de propulsión y manejo.

Al final de la normativa aparecen dos anexos, en el primero aparecen los datos de los buques requeridos y en el segundo se reflejan una serie de verificaciones necesarias que cumplan hagan que se cumpla el código.

Capítulo 6. Diseño e implementación de un algoritmo de evitación de obstáculos

En un buque autónomo la capacidad de esquivar obstáculos de manera automática es fundamental. Por tanto, como aplicación, en este capítulo se profundiza en el tema de la evitación de obstáculos como parte de un sistema de control inteligente que sea capaz de planificar rutas y generar las órdenes necesarias para esquivar un obstáculo y volver a la ruta prevista. El objetivo de este capítulo es proponer, implementar y validar mediante simulación un algoritmo para la determinación de una ruta segura para que un buque autónomo evite una situación de colisión al encontrarse con un obstáculo inmóvil en el mar.

6.1. Control inteligente en buques

Como se ha dicho, el resultado de la investigación en este campo contribuye al desarrollo de nuevas soluciones para un transporte marítimo más eficiente y seguro. Garantizar la seguridad en la navegación de los buques es uno de los temas fundamentales en el transporte marítimo. En este sentido hay que desarrollar sistemas para evitar colisiones.

Un sistema de control inteligente para buques autónomos debe constar de un sistema de guía, un sistema de navegación y un sistema de control del buque.

Los sistemas modernos de control de buques tienen una estructura como la que se muestra a continuación.

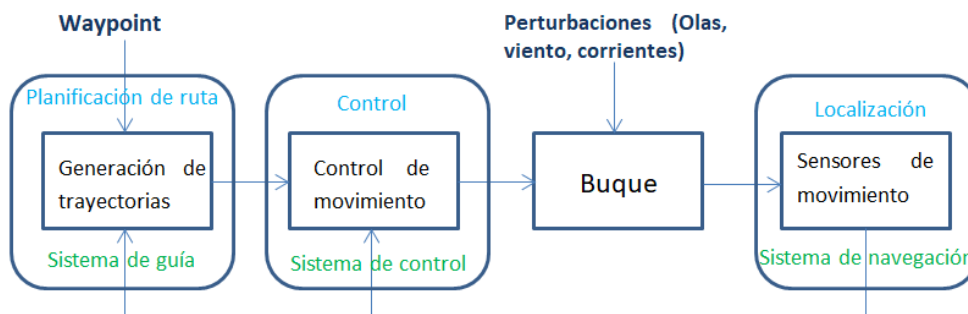


Figura 12. Sistema de control de un buque [47]

Según [47], el sistema GNC (*guiado, navegación, control*) se compone de tres subsistemas principales: el sistema de guía, responsable de la planificación de rutas, el sistema de control, responsable del control de movimiento y el sistema de navegación, responsable de la medición de los parámetros de movimiento (posición, rumbo y velocidad del buque). El componente básico del módulo de planificación de ruta se llama Generador de Trayectoria (GT). Un algoritmo avanzado de optimización, que constituye el núcleo del GT, calcula una ruta segura y óptima para un buque.

La evitación de colisiones en buques es un problema de optimización complejo con varias restricciones y requisitos que deben considerarse. El algoritmo de planificación de la trayectoria del barco debe cumplir los siguientes supuestos:

- Disponibilidad de datos de navegación que describan la situación actual en el mar
- Si el reglamento internacional para la prevención de colisiones en el mar (COLREG) se ajusta a la trayectoria calculada
- Tener en cuenta los obstáculos estáticos (tierras, aguas poco profundas) y dinámicos (buques)
- La distancia de seguridad
- La trayectoria calculada entre la posición actual del propio buque y el punto de ruta final definido de la trayectoria
- Las propiedades dinámicas del sistema operativo considerado
- Si los otros buques mantienen sus parámetros de movimiento
- Las condiciones meteorológicas

6.2. Diseño del algoritmo

El algoritmo propuesto en este trabajo está basado en el algoritmo de un proyecto de un coche autónomo el cual en el carril por el que circula hay un hoyo y lo esquivo cambiándose de carril y finalmente volviendo al carril inicial para recuperar la trayectoria.[49]

En nuestro caso vamos a suponer que disponemos de un buque autónomo con una eslora de L metros, el cual zarpa de un punto inicial con una trayectoria en línea recta y velocidad de v nudos hacia su destino final. Durante la navegación, el buque se encuentra con un obstáculo inmóvil el cual los sensores lo detectan a una distancia determinada y generan la orden de esquivarlo.

El algoritmo debe cumplir las siguientes especificaciones:

- El obstáculo se debe detectar a una distancia determinada. En general la distancia debe ser tal que permita maniobrar. Por ello va a depender de la de la eslora del buque. Si el buque navega a una velocidad normal para sus características, se estima que una distancia de detección de entre 5 y 10 veces la eslora es adecuada.
- El buque no puede entrar en la zona de seguridad que rodea al obstáculo que es dos veces la eslora del buque.
- El buque no puede sobrepasar las líneas de costa. Para ello se considera también una distancia de seguridad definida por una línea recta más allá de la cual se encuentra la costa.
- Tampoco puede pasar de la recta que desvía al buque del obstáculo.
- Una vez sobrepasado el obstáculo el buque debe regresar a su rumbo y trayectoria.

6.3. Modelo predictivo de la dinámica del buque

El objetivo del control predictivo es conseguir que un sistema se comporte según un modelo aun en presencia de perturbaciones o simplificaciones matemáticas. La dinámica final del sistema real sería la misma que la del modelo en ausencia de perturbaciones. En realidad la dinámica real no es la ideal porque el sistema está sometido a incertidumbre paramétrica y perturbaciones. Por su parte, un modelo adaptativo es un modelo que cambia sus parámetros con el tiempo. [50]

En nuestro caso, se considera que el movimiento del buque puede describirse por medio del siguiente modelo en el espacio de estado no lineal:

$$\dot{x} = \cos(\varphi) v$$

$$\dot{y} = \sin(\varphi) v$$

$$\dot{\varphi} = \frac{\tan(\delta)}{L} \cdot v$$

$$\dot{v} = 0.5 \cdot a$$

donde las variables de estado x , y definen la posición del buque, φ es el rumbo y v la velocidad en nudos. Las entradas de control son el ángulo de la pala del timón δ y la aceleración a . L es la eslora del buque en metros.

Supondremos que todas las variables de estado son medibles por ello la salida de la planta serán directamente los 4 estados.

El modelo de predicción en el punto de operación considerado se obtiene a partir del Jacobiano del modelo anterior: [48]

$$\dot{x} = -v \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\varphi} + \cos(\varphi) \cdot v$$

$$\dot{y} = v \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\varphi} + \sin(\varphi) \cdot v$$

$$\dot{\varphi} = \frac{\tan(\delta)}{L} \cdot v + \frac{v \cdot (\tan(\delta)^2 + 1)}{L} \cdot \delta$$

$$\dot{v} = 0.5 \cdot a$$

El modelo se usará en su versión discreta con un periodo de muestreo T_s . Para discretizar se usa el mantenedor de orden cero (*zero order hold*) que es el método más usado para discretizar plantas puesto que mantiene invariante la respuesta al escalón.

Las condiciones iniciales son $x=y=0$, rumbo 0° y velocidad 16kn; aceleración 0m/s^2 y pala del timón a 0° .

6.4. Controlador y restricciones

El controlador predictivo permite generar una señal de control a partir del modelo de predicción que satisfaga ciertas restricciones. En concreto se puede forzar la señal de control $u_{\text{mpc}} = (a \ \delta)^T$ y la salida $y_{\text{mpc}} = (x \ y \ \varphi \ v)^T$ a satisfacer la siguiente restricción:

$$E \cdot u_{\text{mpc}} + F \cdot y_{\text{mpc}} \leq G$$

Ello es lo que permite forzar a la salida posición del barco (x,y) a no entrar en ciertas regiones. La señal de control generada por el controlador adaptativo-predictivo se puede obtener con ayuda de la función **mpcmoveAdaptive** de Matlab, para cada intervalo de muestreo.

Se supone que la velocidad de giro de la planta del timón está limitada a 6 grados por segundo y también la aceleración está limitada a una pendiente de 0.2 positiva y/o negativa.

Con respecto a la zona de exclusión, el buque no debe sobrepasar la región definida por dos rectas: una por arriba (y_1), una por abajo ($-y_1$) las cuales definen el “canal” por donde debe navegar sin desviarse de su ruta. Estas rectas sirven también para estrechar el canal de navegación en el caso en que el buque circula cerca de la costa. Así se evita el peligro de embarranque.

En el caso de detección del obstáculo, se define una región de seguridad alrededor de él con una anchura de dos veces el canal de navegación y una altura de dos veces la eslora del barco, desde el centro del obstáculo por encima y por debajo. Otros criterios para la definición de la zona de seguridad serían válidos también.

En caso de detección de obstáculo, pues, se define una tercera línea (y_2) que va desde el buque hasta el extremo superior izquierdo de la zona de seguridad. Es decir, se esquivará el obstáculo virando a babor y dejándolo a estribor. También sería posible programar diferentes maniobras y prioridades según los convenios que regulan el tráfico marítimo en cada región.

El controlador adaptativo generará a cada instante de muestreo una señal de control u_{mpc} tal que la posición del barco esté siempre dentro de las tres líneas. Para ello girará la pala del timón y si es necesario reducirá la velocidad del buque.

A cada instante de muestreo las tres rectas se recalcularán (especialmente la recta y_2 que es la que desvía de su trayectoria al buque). Una vez sobrepasado el obstáculo, el buque volverá a las condiciones iniciales de rumbo y trayectoria.

6.5. Simulación del comportamiento

En el apéndice está el programa Matlab que implementa la evitación de obstáculos.

El algoritmo es general, es decir, sirve tanto para un mercante como para una embarcación de recreo. El parámetro más importante es la eslora L puesto que determina la maniobrabilidad y por tanto a partir de ella definimos la zona de seguridad. Por este motivo, las distancias están escaladas entre 0 y 100. En todo caso, las simulaciones se han realizado considerando una

velocidad nominal de 16 kn. Para verificar el correcto funcionamiento con Matlab obtenemos la representación de las figuras siguientes:

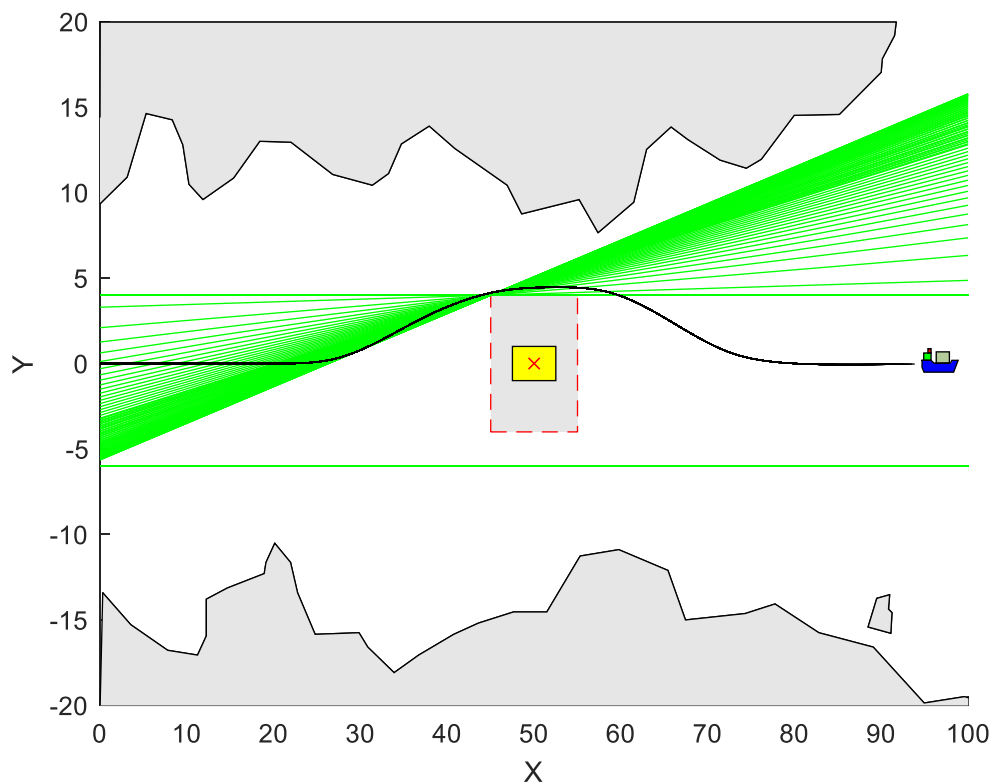


Figura 13. Trayectoria del buque autónomo.

Como se puede apreciar, en su trayectoria, el buque se encuentra con el obstáculo amarillo, que representa una isla o un obstáculo inmóvil. Este está rodeado por una zona de seguridad en color gris y con el perímetro en rayas rojas. El buque lo esquiva siguiendo las líneas verdes que hacen que cumpla todas las medidas de seguridad y de restricciones. Una vez pasado el obstáculo, el buque ya puede volver a retomar su trayectoria hasta el final de su recorrido. El recorrido se ha escalado entre 0 y 100.

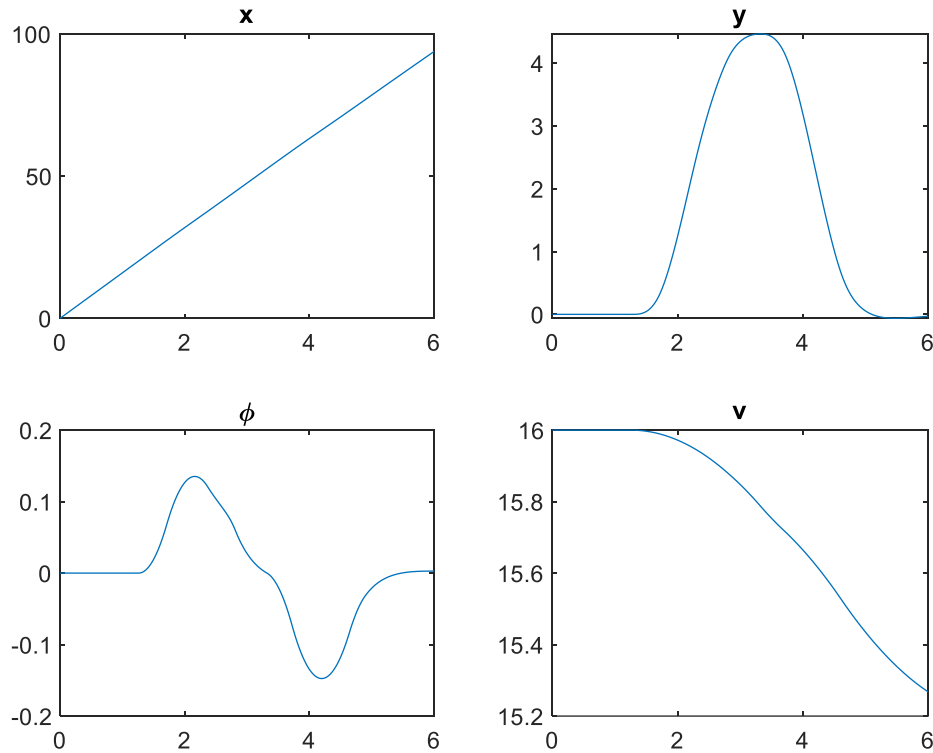


Figura 14. Comportamiento de x , y , ϕ y v

La Figura 14 muestra cuatro gráficas que representan a los cuatro estados.

- Las gráficas x e y representan la posición del centro de gravedad del buque en coordenadas cartesianas. La x presenta como el buque tiene un incremento constante, por lo tanto, el buque está en movimiento y avanza en x . La y presenta una curva que es la que se dibuja el buque al esquivar el obstáculo.
- La ϕ representa el rumbo del buque el cual sale con rumbo 0, hacia el norte, pero al detectar el obstáculo cambia el rumbo para el oeste en sentido positivo y al sobrepasar el obstáculo el rumbo cambia para el noreste en sentido negativo para recuperar el rumbo final que es el mismo que el inicial
- La v representa la variación de velocidad del buque durante la navegación la cual es de 16 nudos al inicio de la ruta pero al detectarse el obstáculo disminuye un poco para poder controlar el buque y luego va recuperando al alejarse del obstáculo.

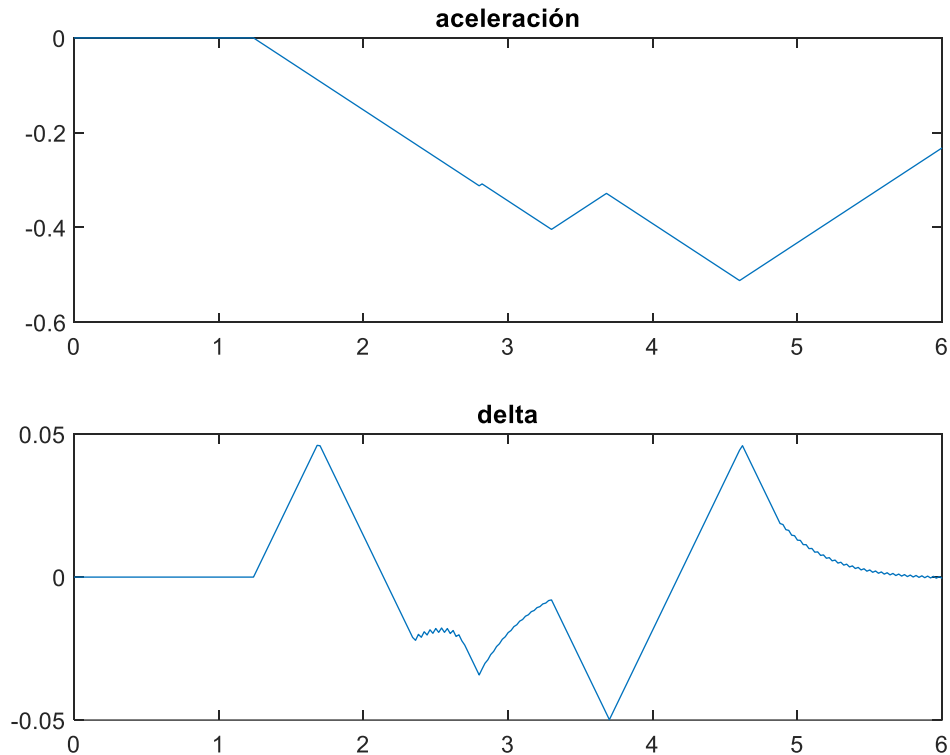


Figura 15. Comportamiento de a y δ

La figura 15 muestra las dos gráficas que representan las dos señales de control

- En la aceleración se muestra que el buque va a una velocidad constante y al detectar el obstáculo desacelera el buque, disminuyendo así la velocidad y cuando pasa el obstáculo, acelera para que el buque regrese a la velocidad de 16 nudos.
- La delta corresponde al ángulo de la pala del timón donde muestra se gira el timón en sentido positivo para girar a babor y en sentido negativo para girar el timón para estribor.

A continuación se analiza el efecto de los diferentes parámetros:

Efecto de la velocidad el buque: Si la velocidad inicial del buque es superior, la inercia al superar el obstáculo hace que se desvíe más de su ruta, comparado con el caso nominal en que la trayectoria se separaba muy poco de la zona de seguridad. La siguiente figura muestra el caso de 18kn.

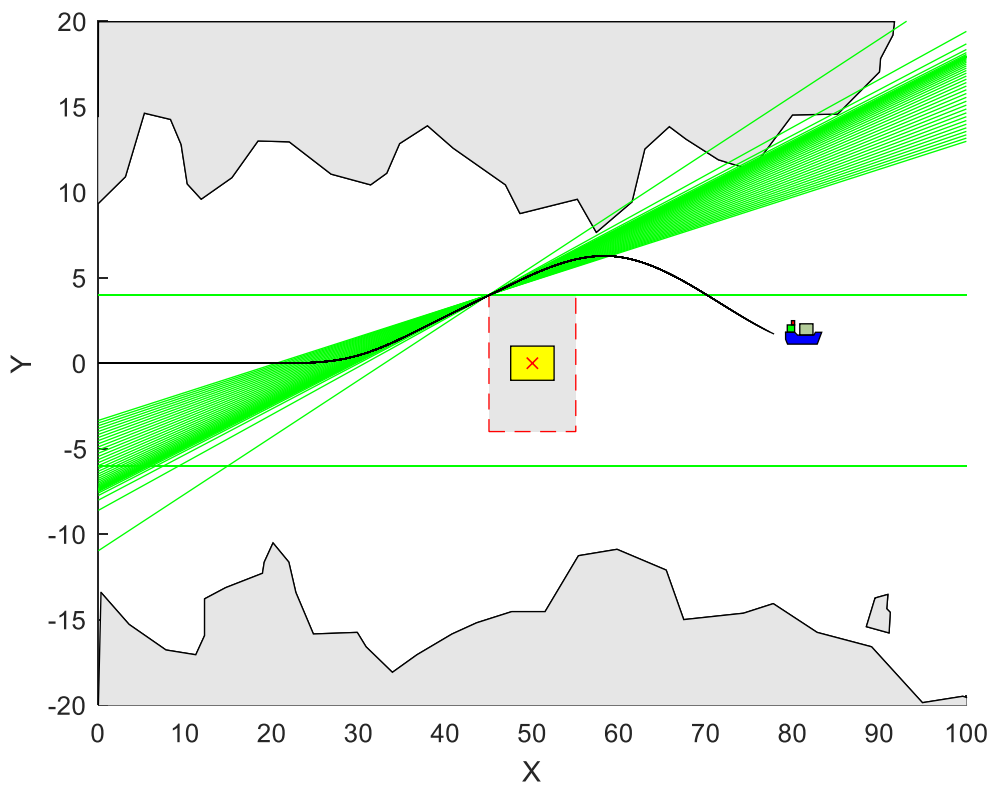


Figura 16. Velocidad 18kn

Efecto de la distancia de detección: Las siguientes figuras muestran el efecto de la distancia de detección a la velocidad nominal de 16kn. Si la distancia es grande (Figura 17, correspondiente a 8 veces la eslora del barco) la maniobra de esquiva se realiza mucho antes y el comportamiento es muy suave. En cambio, si es demasiado pequeña (2 veces la eslora del barco) el sistema no es capaz de encontrar solución al problema de optimización planteado y la solución diverge (Figura 18). Este último problema se puede resolver cambiando las dimensiones de la zona de seguridad, por ejemplo, o bien ponderando las señales de control (Figura 19).

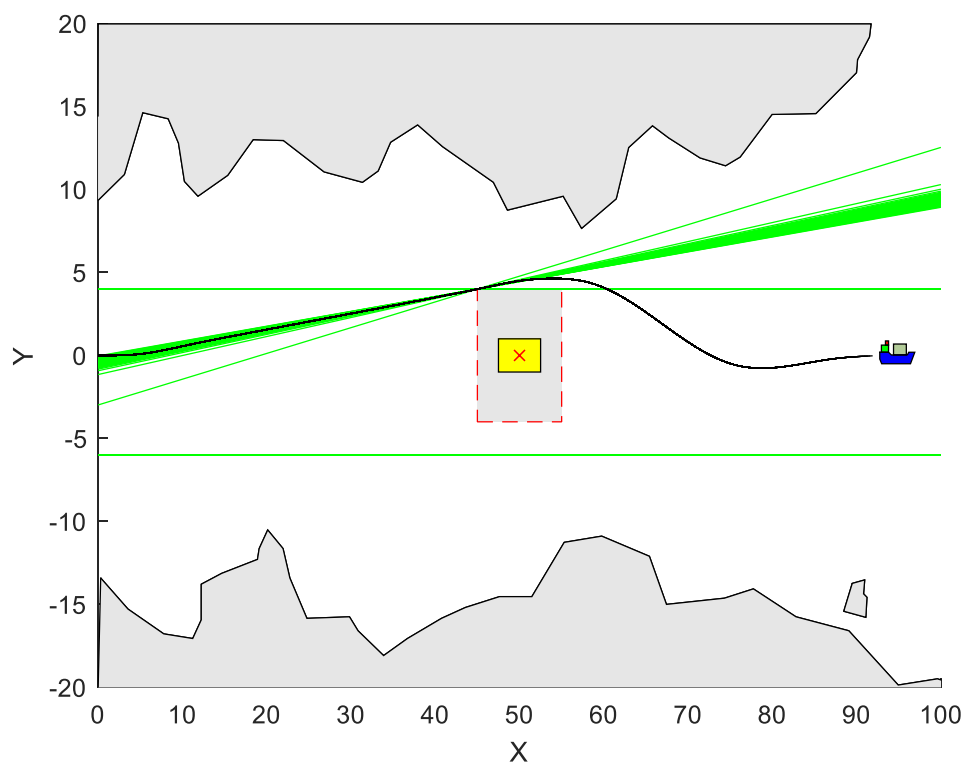


Figura 17. Detección a 8 veces la eslora del barco

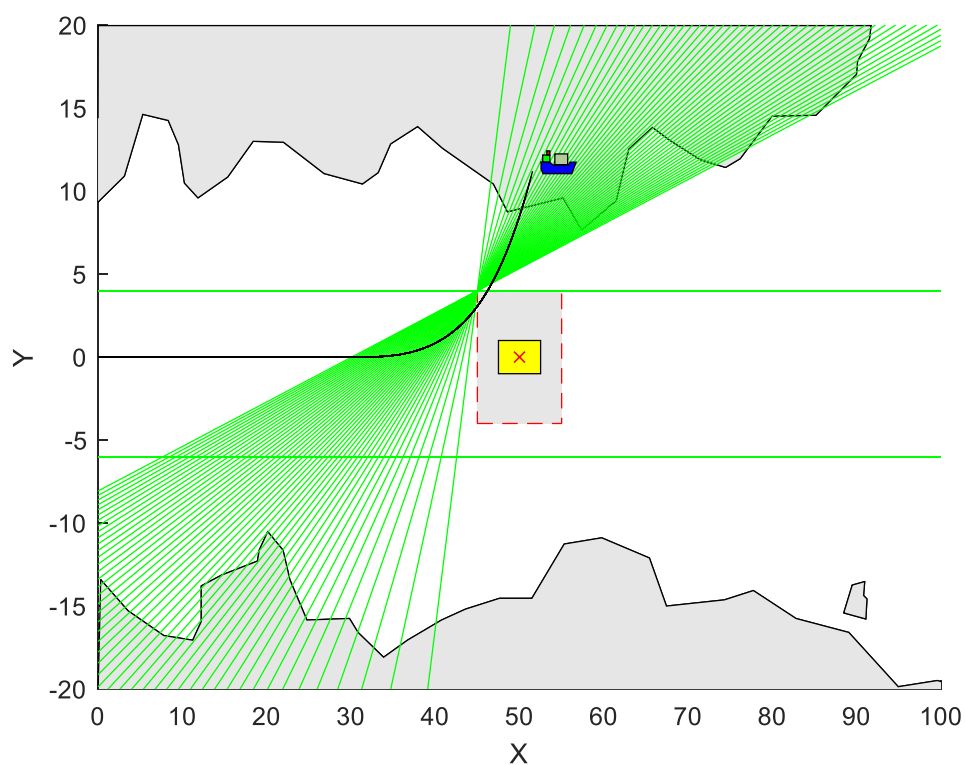


Figura 18. Detección a 2 veces la eslora del barco.

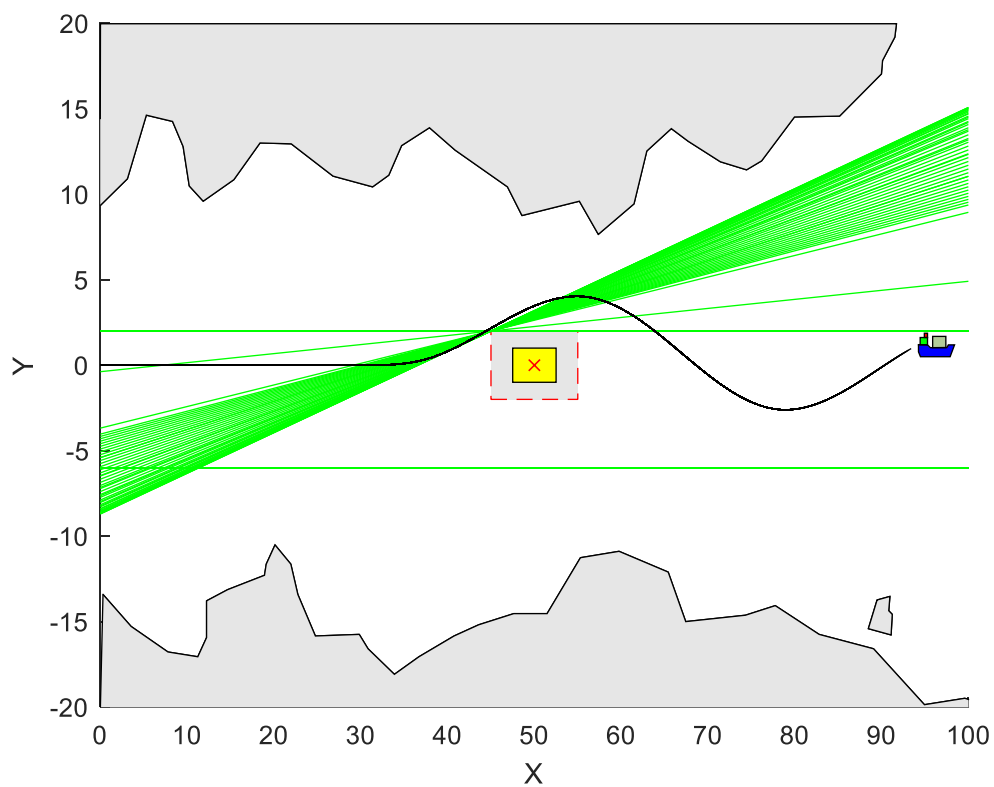


Figura 19. Detección a 2 veces la eslora del barco pero zona segura más reducida.

Capítulo 7. Conclusiones

En la introducción del proyecto se evidencia que la mayoría de los accidentes que se registran en el sector marítimo es consecuencia del factor humano. Por lo tanto, el cambio del personal a bordo por la maquinaria autónoma o controlada remotamente disminuiría este tanto por cierto de accidentes al mínimo.

Como conclusión del proyecto se podría decir tras la investigación entre todas las tesis, artículos y trabajos que se han encontrado en diferentes fuentes sobre los buques autónomos es que el sector marítimo está evolucionando progresivamente. Muchos de los sistemas a bordo de los buques actuales ya disponen de un tipo de operación que la hace autónoma sin que el operario haya que accionar nada, sino solamente tenga que supervisar la operación. Esto no solo está pasando en el sector marítimo, sino que ya hay muchos otros puestos de trabajo que las personas han sido reemplazadas por maquinaria autónoma y dichas personas se han especializado para poder supervisar las operaciones que hace la máquina.

Con este sistema se disminuirían los ataques de piratas y los robos armados a bordo ya que no tendríamos de dotaciones a bordo y los buques tendrían un sistema que sellaría e impediría la entrada de cualquier ataque impidiendo así poder controlar el buque y robarlo.

Todo cambio tiene sus pros y sus contras, sus ventajas y desventajas. Este proceso puede que sea lento o que nunca llegue a ser posible, pero la escasez en la oferta de dotaciones para los buques actuales hace que el negocio del sector marítimo quiera dar un cambio.

Si esto llega a suceder y se cambian ciertos buques con tripulación por buques sin, solo los tripulantes de dicha nave sabrían cuáles serían los cambios y consecuencias que eso ocasionaría. Los alumnos no sabrían navegar, solo sabrían ver lo que dice una pantalla, unos sensores y unas cámaras.

Tampoco todos los buques podrían ser autónomos ya que, por ejemplo, los turistas de un crucero no tendrían tanta seguridad y confianza al navegar en un crucero tripulado por personas que con uno que esté al cargo de un ordenador. Otros buques serían el de salvamento marítimo en caso de naufragios, el de aduanas para la vigilancia de las actividades ilícitas en alta mar, los buques de la armada o los buques hospital.

Uno de los aspectos que frena o atrasa los estudios que se están realizando es el tema de fiabilidad y la seguridad de estos buques. Es por este tema que muchos de trabajos y prototipos de diferentes empresas no cumplen los plazos previstos.

Todavía hay muchas preguntas por resolver sobre esta tecnología y muchos puntos de vista y opiniones de profesionales en el sector marítimo.

Con respecto a la parte de aplicación se ha programado y ensayado por simulación un algoritmo de evitación de obstáculos basado en un algoritmo ya existente que se usa en coches. Los resultados muestran que, con buenos sensores, la evitación de obstáculos es posible, aunque todavía quedan muchos problemas por resolver como por ejemplo la evitación autónoma de colisiones con obstáculos que se mueven o con múltiples obstáculos.

Bibliografía y referencias

- Introducción

[1] Crawford, James: *Operaciones con buques no tripulados ¿fin de los accidentes en el mar?*. Revista de Marina Nº 964, pp.60-65. [Consulta: 19 diciembre 2018]. Disponible en <<https://revistamarina.cl/revistas/2018/3/jcrawfordc.pdf>>.

[2] *Definición de OMI*. OMI. [Consulta: 19 diciembre 2018]. Disponible en <<http://www.imo.org/es/Paginas/Default.aspx>>.

[3] *Los primeros buques autónomos sin tripulación operarán en 2025, según la OMI*. El Confidencial. Junio 2018. [Consulta: 19 diciembre 2018]. Disponible en <https://www.elconfidencial.com/ultima-hora-en-vivo/2018-06-12/los-primeros-buques-autonomos-sin-tripulacion-operaran-en-2025-segun-la-omi_1544031/>.

[4] *The production of unmanned vessels and its legal implications in the maritime industry*. UiO, Faculty of Law, University of Oslo, November 2014. [Consulta: 3 marzo 2019]. Disponible en <<https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/42119/Thesis-final-draft.pdf?sequence=1>>.

[5] *Definición de autonomía*. RAE. [Consulta: 15 marzo 2019]. Disponible en <<https://dle.rae.es/?id=4TsdBo>>.

[6] Matus, Daniel: *La historia de los carros autónomos contada en unos pocos hitos*. Digital Trends. Noviembre 2017. [Consulta: 13 noviembre 2018]. Disponible en <<https://es.digitaltrends.com/autos/historia-carros-autonomos/>>.

[7] Bejerano, Pablo G: *La desconocida historia de los coches autónomos*. Agosto 2013. [Consulta: 13 noviembre 2018]. Disponible en <<https://blogthinkbig.com/historia-de-los-coches-autonomos>>.

[8] García Oliva, Carlos: *Esta es la historia del coche autónomo, y ojo porque no es tan nuevo como lo pintan*. Agosto 2018. [Consulta: 13 noviembre 2018]. Disponible en <<https://www.autonocion.com/historia-coche-autonomo/>>.

[9] *Primer accidente mortal de un Tesla 'S', con el piloto automático activado*. El mundo. Julio 2016. [Consulta: 30 abril 2019]. Disponible en <<https://www.elmundo.es/motor/2016/07/01/5775e50022601dba108b4660.html>>.

[10] Ortiz, Fernando: *Los barcos serán los siguientes vehículos autónomos*. MCPRO. Septiembre 2017. [Consulta: 13 noviembre 2018]. Disponible en <<https://www.muycomputerpro.com/2017/09/15/barcos-vehiculos-autonomos>>.

- **Estudios ya realizados**

[11] Nordenstahl, Gustavo: *Buques sin tripulación, el futuro está aquí, ya ha llegado*. Noviembre 2017. [Consulta: 14 noviembre 2018]. Disponible en <<http://www.nuestromar.org/files/BUQUES-NO-TRIPULADOS-GN.pdf>>.

[12] MUNIN, *Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks*. [Consulta: 20 marzo 2019]. Disponible en <<http://www.unmanned-ship.org/munin/>>.

[13] *Research in maritime autonomous systems project results and technology potentials*. MUNIN, 2016. [Consulta: 20 marzo 2019]. Disponible en <<http://www.unmanned-ship.org/munin/wp-content/uploads/2016/02/MUNIN-final-brochure.pdf>>.

[14] *Remote and Autonomous Ships, The next steps*. Rolls-Royce, 2016. [Consulta: 20 marzo 2019]. Disponible en <<https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/ship-intel/aawa-whitepaper-210616.pdf>>.

[15] S. ZAvia, Matías: *El primer buque de contenedores electico y autónomo zarpará de Noruega en 2018*. Gizmodo. Noviembre 2017. [Consulta: 4 diciembre 2018]. Disponible en <<https://es.gizmodo.com/el-primer-buque-de-contenedores-electrico-y-autonomo-za-1795132191>>.

[16] *Yara Birkeland press kit*. Yara International. [Consulta: 1 mayo 2019]. Disponible en <<https://www.yara.com/news-and-media/press-kits/yara-birkeland-press-kit/>>.

[17] Skredderberget, Asle: *The first ever zero emission, autonomous ship*. Yara. March 2018. [Consulta: 20 marzo 2019]. Disponible en <<https://www.yara.com/knowledge-grows/game-changer-for-the-environment/>>.

[18] *The World's First Electric Autonomous Container Ship To Set Sail In Norway*. August 2018. [Consulta: 20 marzo 2019]. Disponible en <<https://cleantechnica.com/2018/08/23/the-worlds-first-electric-autonomous-container-ship-to-set-sail-in-norway/>>.

- [19] Moya, Pedro: *El primer buque de carga autónomo sin tripulación zarpará en 2018*. El Español. Julio 2017. [Consulta: 4 diciembre 2018]. Disponible en <<https://omicro.no.es/2017/07/buque-de-carga-autonomo-sin-tripulacion/>>.
- [20] Soler, Alex: *Yara Birkeland: el barco eléctrico que navega sin tripulación llegará en 2020*. Híbridos y eléctricos. Agosto 2018. [Consulta: 4 diciembre 2018]. Disponible en <<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/yara-birkeland-barco-electrico-navega-tripulacion-llegara-2020/20180825115117021345.html>>.
- [21] *ReVolt, el barco sin tripulación que revolucionará el comercio marítimo*. [Consulta: 20 diciembre 2018]. Disponible en <<https://www.eaprogramas.es/internacionalizacion/revolt-el-barco-sin-tripulacion-que-revolucionara-el-comercio-maritimo>>.
- [22] *The ReVolt. A new inspirational ship concept*. DNV GL. [Consulta: 20 diciembre 2018]. Disponible en <<https://www.dnvgl.com/technology-innovation/revolt/index.html>>.
- [23] Anton Tvete, Hans: *UNMANNED VESSELS – THE DNV GL “REVOLT” PROJECT*. IUMI. 2015. [Consulta: 20 diciembre 2018]. Disponible en <https://iumi.com/images/Berlin2015/3Pressies/1609_HansAntonTvete.pdf>.
- [24] *Unmanned ships on the horizon*. DNV GL. [Consulta: 20 diciembre 2018]. Disponible en <<https://www.dnvgl.com/article/unmanned-ships-on-the-horizon-94273>>.
- [25] *Cyber-enabled ships. Deploying information and communications technology in shipping – Lloyd’s Register’s approach to assurance*. Lloyd’s Register. February 2016. [Consulta: 24 marzo 2019]. Disponible en <<https://www.arbitrage-maritime.org/fr/Gazette/G43complement/lloyds.pdf>>.
- [26] *Rolls Royce abre un centro de I+D para buques autónomos en Finlandia*. Revista del sector marítimo. Enero 2018. [Consulta: 3 diciembre 2018]. Disponible en <<https://sectormaritimo.es/rolls-royce-abre-centro-id-buques-autonomos-finlandia>>.
- [27] *Rolls-Royce abre centro de investigación y desarrollo para buques autónomos*. Portal Portuario. Enero 2018. [Consulta: 3 diciembre 2018]. Disponible en <<https://portalportuario.cl/rolls-royce-abre-centro-investigacion-desarrollo-buques-autonomos/>>.

[28] Oliveira, Juan A: *Rolls-Royce quiere sus buques autónomos en el mar en el 2020*. Va de Barcos. Febrero 2017. [Consulta: 3 diciembre 2018]. Disponible en <<https://vadebarcos.net/2017/02/23/rolls-royce-quiere-sus-buques-autonomos-en-el-mar-en-el-2020/>>.

[29] Sputnik: *Rolls-Royce prevé lanzar buques sin tripulación*. Instituto de estrategia. Octubre 2018. [Consulta: 13 noviembre 2018]. Disponible en <<http://www.institutodeestrategia.com/video/eurasia/rolls-royce-preve-lanzar-buques-tripulacion/20181017122144017445.html>>.

[30] Cañal, Pablo: *Intel y Rolls-Royce se asocian para desarrollar barcos autónomos*. El chapuzas informático. Octubre 2018. [Consulta: 13 noviembre 2018]. Disponible en <<https://elchapuzasinformatico.com/2018/10/intel-y-rolls-royce-se-asocian-para-desarrollar-barcos-autonomos/>>.

[31] Arteaga, Sandra: *Intel y Rolls-Royce se asocian para crear barcos autónomos*. Computer Hoy. Octubre 2018. [Consulta: 13 noviembre 2018]. Disponible en <<https://computerhoy.com/noticias/motor/intel-rolls-royce-asocian-crear-barcos-autonomos-315407>>.

[32] Bosch, Daniel: *DMA estima que la normativa para buques autónomos debería decidirse a nivel internacional*. BoschWood. [Consulta: 10 diciembre 2018]. Disponible en <<http://www.boschwood.com/dma-estima-normativa-buques-autonomos-deberia-decidirse-nivel-internacional/>>.

[33] Allan, Robert: *Revolutionary Ramora brings tele-operated capability to ship handling*. Robert Allan LTD. September 2015. [Consulta: 24 marzo 2019]. Disponible en <<https://ral.ca/2015/09/18/revolutionary-ramora-brings-tele-operated-capability-to-ship-handling/>>

[34] Amoedo, Adrián: *Las petroleras también quieren un buque autónomo*. Prensa Faro de Vigo. Agosto 2017. [Consulta: 24 marzo 2019]. Disponible en <<https://www.farodevigo.es/economia/2017/08/17/petroleras-quieren-buque-autonomo/1734706.html>>.

[35] Alexis P. Cárdenas, Chris Hancock, Vicente Carrasco: *El futuro autónomo de los levantamientos hidrográficos*. Kongsberg. 2012. [Consulta: 24 marzo 2019]. Disponible en <https://www.iho.int/mtg_docs/rhc/SEPHC/SEPHC13/CHRPSE13-2.5.1-Kongsberg.pdf>.

[36] MSA: *China sigue adelante con el desarrollo del proyecto de naves no tripuladas*. 20standard. Agosto 2015. [Consulta: 6 febrero 2019]. Disponible en <<https://20standard.wordpress.com/2015/08/21/china-sigue-adelante-con-el-desarrollo-del-proyecto-de-naves-no-tripuladas/>>.

- **Pros, contras y aspectos a considerar**

[37] Minter, Adam: *El futuro del transporte marítimo: cómo funcionarán los barcos sin tripulación*. Mayo 2017. [Consulta: 10 diciembre 2018]. Disponible en <<https://www.infobae.com/america/wapo/2017/05/26/el-futuro-del-transporte-maritimo-como-funcionaran-los-nuevos-barcos-sin-tripulacion/>>

[38] Ponz Camps, Francisco: *Navegación automática en un vehículo con distribución ackermann*. Tesis final de master. Universidad politécnica de valencia. [Consulta: 10 diciembre 2018]. Disponible en <<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/74308/PONZ%20%20NAVEGACIÓN%20AUTOMÁTICA%20EN%20UN%20VEHÍCULO%20ELÉCTRICO%20LIGERO%20CON%20DISTRIBUCIÓN%20ACKERMANN..pdf?sequence=3>>.

[39] [Consulta: 4 abril 2019]. Disponible en <<https://neuvoo.com.mx/neuvooPedia/es/oficial-de-cubierta/>>

- **Legislación**

[40] *Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar*. OMI. [Consulta: 9 febrero 2018]. Disponible en <[http://www.imo.org/es/about/conventions/listofconventions/paginas/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-\(solas\)-1974.aspx](http://www.imo.org/es/about/conventions/listofconventions/paginas/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas)-1974.aspx)>.

[41] *Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques*. OMI. [Consulta: 10 febrero 2019]. Disponible en <[http://www.imo.org/es/about/conventions/listofconventions/paginas/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-\(marpol\).aspx](http://www.imo.org/es/about/conventions/listofconventions/paginas/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx)>.

[42] *Convenio de regulación internacional para prevenir las colisiones en el mar*. OMI. [Consulta: 11 febrero 2019]. Disponible en <<http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/COLREG.aspx>>.

[43] *Convenio internacional en estándares de formación, certificación y vigilancia para la gente del mar*. OMI. [Consulta: 11 febrero 2019]. Disponible en <<http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International->

Convention-on-Standards-of-Training,-Certification-and-Watchkeeping-for-Seafarers-(STCW).aspx >.

[44] *Convenio sobre el Trabajo Marítimo*. Gobierno de España. Ministerio de fomento. 2006. [Consulta: 13 febrero 2019]. Disponible en <<https://www.fomento.es/areas-de-actividad/marina-mercante/normativa/convenio-sobre-el-trabajo-maritimo-2006>>.

[45] *MLC, 2006: ¿qué es y qué hace?*. Organización internacional del trabajo. [Consulta: 13 febrero 2019]. Disponible en <<https://www.ilo.org/global/standards/maritime-labour-convention/what-it-does/lang--es/index.htm>>.

[46] *Design Code for Unmanned Marine Systems*. Lloyd's Register. February 2017. [Consulta: 15 febrero 2019]. Disponible en <<https://maritimecyprus.files.wordpress.com/2017/06/lloyds-design-code-for-unmanned-marine-systems-february-2017.pdf>>.

[47] Grifoll, M., Martínez de Osés, F.X., Castells, M. y Martin, A.: *19th Annual General Assembly (AGA) of the International Association of Maritime Universities (IAMU)*. CIMNE. 2018.

[48] *Obstacle Avoidance Using Adaptive Model Predictive Control*. Mathworks. [Consulta: 5 abril 2019]. Disponible en <https://es.mathworks.com/help/mpc/ug/obstacle-avoidance-using-adaptive-model-predictive-control.html?searchHighlight=obstacle%20avoidance&s_tid=doc_srchtile>.

[49] J-M Park, D-W Kim, Y-S Yoon, H J Kim and K-S Yi: *Obstacle avoidance of autonomous vehicles based on model predictive control*. June 2009. Seoul National University. [Consulta: 26 abril 2019].

[50] Martín Sanchez, Juan y Rodellar, José: *Adaptive Predictive Control. From the Concepts to Plants Optimization*. 1996. Prentice Hall. [Consulta: 03 mayo 2019].

Apéndices

- Modelo_barco

```
function [Ad,Bd,Cd,Dd,U,Y,X,DX] = modelo_barco(Ts,x,u)

% sistema continuo a partir del jacobiano del modelo NL:
eslora = 5;
phi = x(3);
V = x(4);
delta = u(2);
Ac = [ 0, 0, -V*sin(phi), cos(phi);
       0, 0,  V*cos(phi), sin(phi);
       0, 0, 0,          tan(delta)/eslora;
       0, 0, 0,          0];
Bc = [0 , 0;
      0 , 0;
      0 , (V*(tan(delta)^2 + 1))/eslora;
      0.5, 0];
Cc = eye(4);
Dc = zeros(4,2);
sys=ss(Ac,Bc,Cc,Dc);

% Modelo discreto ZOH.
sysd=c2d(sys,Ts);
[Ad,Bd,Cd,Dd]=ssdata(sysd);

% Ecuaciones de estado planta discreta (condiciones nominales)
X = x;
U = u;
Y = x; %la salida del sistema son los estados (se suponen medibles)
DX = Ad*x+Bd*u-x;
```

- Actualizar_restricciones

```
function [E,F,G,restr_pend,restr_ord] =
actualizar_restricciones(x,detectado,obstaculo,margen)
```

```

%da las matrices E,F,G
%y la pendiente y ordenada en el origen para construir las rectas de
%restricción

%posición barco
posX = x(1);
posY = x(2);

% si hay detección se calculan las restricciones E,F,G
%si no, se dejan E,F,G como en el caso inicial (sin detección,
segunda=tercera)
if detectado

    %pendiente recta que debe seguir barco
    pend = ( (obstaculo.piYsegura - posY)/(obstaculo.piXsegura - posX)
);

%si el barco no ha llegado al obstáculo
if (posX<=obstaculo.piXsegura)
    if (posY>obstaculo.piYsegura)
        restr_pend = 0;
        restr_ord = obstaculo.piYsegura;
    else
        restr_pend = tan(atan2(pend,1));
        restr_ord = obstaculo.piYsegura -
restr_pend*obstaculo.piXsegura;
    end

elseif ( (posX>obstaculo.piXsegura) && (posX<=obstaculo.fiX) )
    restr_pend = 0;
    restr_ord = obstaculo.piYsegura;

%si ha pasado 1 obstáculo, usar la restricción fake
else
    restr_pend = 0;
    restr_ord = -margen;

```

```

end
else
    restr_pend = 0;
    restr_ord = -margen;
end

% Matrices de restricción
E = [0 0;0 0;0 0];
F = [0 1 0 0;0 -1 0 0;restr_pend -1 0 0];
G = [margen;margen;-1*restr_ord];

```

- Evitación_obstaculos

```

%evitación_obstaculos
close all,clear all,clc

%este fichero usa:  modelo_barco.m y actualizar_restricciones.m

%Especificaciones-----
-----

%el barco sigue una trayectoria de referencia, evitando obstáculos

%el obstáculo puede ser estático [o una embarcación que se mueve
%lentamente]

%el modelo de la planta y las restricciones (zona donde no puede
entrar el barco)
%se actualizan en tiempo real (en cada intervalo de control) mediante
técnicas
%de control predictivo

%DETECCIÓN: sensor mide la distancia de la proa al obstáculo en
%línea recta

%se intentará pasar el obstáculo virando a babor (dejando el obstáculo
a

```

```
%estribor). Cuando se haya sobrepasado el obstáculo se volverá a la
%trayectoria de referencia
```

```
%se tendrá en cuenta una restricción consistente en un contorno de
seguridad
```

```
%a una distancia de XXX de la costa a fin de que, en la maniobra de
evitación del obstáculo,
```

```
%el barco no embarranque en la costa o en una zona de poca
profundidad. En ese caso,
```

```
%si es necesario, se dejará el obstáculo a babor
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   REFERENCIA (velocidad y trayectoria hacia way point)   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%velocidad que debe mantener (V)      %punto de operación 16kn
```

```
%rumbo hacia el waypoint (phi)
```

```
V_r=16;
```

```
phi_r=0;
```

```
referencia = [0 0 phi_r V_r];
```

```
%condiciones iniciales
```

```
x0 = [0; 0; phi_r; V_r];
```

```
u0 = [0; 0];
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   MODELO DEL BARCO Y MODELO DE PREDICCIÓN LINEAL   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%4 estados:
```

```
%   x,y posición del centro de gravedad del barco en coordenadas
cartesianas
```

```
%   fi rumbo (positivo para estribor)
```

```
%   v velocidad del barco
```

```
%2 señales de control:
```

```
% a aceleración
% delta ángulo pala del timón

%Modelo NL (ecuaciones de estado, todos los estados son observables)

%Modelo de predicción lineal en el pto de operación se construye a
partir
%de los jacobianos del modelo NL

%Modelo discreto (ecuaciones de estado)
Ts = 0.02;
[Ad,Bd,Cd,Dd,U,Y,X,DX] = modelo_barco(Ts,x0,u0);
barco = ss(Ad,Bd,Cd,Dd,'Ts',Ts);
barco.InputName = {'Propulsión','Delta'};
barco.StateName = {'X','Y','Phi','V'};
barco.OutputName = barco.StateName;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OBSTÁCULO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Obstáculo (fijo)-----
-----

obstaculo = struct;

%detección (alcance del sensor 30m)
obstaculo.DistanciaDeteccion =30;

%dimensiones:
obstaculo.largo = 5;
obstaculo.ancho = 2;

%posición del obstáculo: 50m delante del barco, en el centro de su
trayectoria
obstaculo.X = 50;
obstaculo.Y = 0;
```



```
%geometria del obstáculo (rectángulo)
% frente izqda
obstaculo.fiX = obstaculo.X+obstaculo.largo/2;
obstaculo.fiY = obstaculo.Y+obstaculo.ancho/2;
% frente dcha
obstaculo.fdX = obstaculo.X+obstaculo.largo/2;
obstaculo.fdY = obstaculo.Y-obstaculo.ancho/2;
% posterior izda
obstaculo.piX = obstaculo.X-obstaculo.largo/2;
obstaculo.piY = obstaculo.fiY;
% posterior dcha
obstaculo.pdX = obstaculo.X-obstaculo.largo/2;
obstaculo.pdY = obstaculo.fdY;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   CONTORNO DE COSTA   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Costa_Norte=[-0.0321    9.3316
  3.1139    10.9043
  5.2969    14.6265
  8.3145    14.2595
  9.5344    12.7916
 10.2407    10.4849
 11.8458     9.5937
 15.3771    10.8519
 18.3947    13.0013
 21.9902    12.9489
 26.8055    11.0616
 31.3641    10.4325
 33.2260    11.1140
 34.7027    12.8440
 37.9129    13.8925
 40.8664    12.5819
 46.9016    10.4325
 48.5709     8.7549
 55.1840     9.5937
 57.3670     7.6540
 61.4761     9.4364
 62.9528    12.5295
 65.7778    13.8401
```

```

67.7040    13.1062
71.4279    11.9004
74.4455    11.4286
76.1790    11.9528
79.9671    14.5216
85.1677    14.5740
89.9831    17.0380
90.1115    17.8244
91.5240    19.1874
91.7166    19.9738
0.01 19.9738];

```

```
Costa_Sur=[0.3033  -13.4112
```

```

    3.5387  -15.2804
    7.7852  -16.7757
   11.2229  -17.0561
   12.2339  -15.9346
   12.2339  -13.7850
   14.6605  -13.1308
   18.9070  -12.2897
   19.1092  -11.6355
   20.1203  -10.5140
   21.9402  -11.6355
   22.7491  -13.4112
   24.7712  -15.8411
   29.8265  -15.7477
   30.8376  -16.5888
   33.8708  -18.0841
   36.7018  -17.0561
   40.7461  -15.8411
   43.5771  -15.1869
   47.6214  -14.5327
   51.4634  -14.5327
   55.3055  -11.2617
   59.7542  -10.8879
   65.4162  -12.1028
   67.4383  -15.0000
   74.3136  -14.6262
   77.7512  -14.0654
   82.8066  -15.7477
   89.0752  -16.5888

```

```

94.9394  -19.8598
99.5903  -19.4860
103.0280 -20.0467
0 -20.0467];

isla=[89.4825  -13.7353
88.4745  -15.4128
91.0954  -15.7798
91.2298  -14.5740
90.8266  -14.3644
90.9610  -13.5256
89.4825  -13.7353];

margen=6;  %para que no embarranque

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   ZONA DE SEGURIDAD   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%zona de seguridad-----
-----

%zona de seguridad (largo=2 x eslora, ancho=2 x ancho_canal)
obstaculo.zona_seguridad_X = obstaculo.largo;
obstaculo.zona_seguridad_Y = 4;

%geometría de la zona de seguridad (rectángulo)
% f i
obstaculo.fiXsegura = obstaculo.X+obstaculo.zona_seguridad_X;
obstaculo.fiYsegura = obstaculo.Y+obstaculo.zona_seguridad_Y;
% f d
obstaculo.fdXsegura = obstaculo.X+obstaculo.zona_seguridad_X;
obstaculo.fdYsegura = obstaculo.Y-obstaculo.zona_seguridad_Y;
% p i
obstaculo.piXsegura = obstaculo.X-obstaculo.zona_seguridad_X;
obstaculo.piYsegura = obstaculo.fiYsegura;
%p d
obstaculo.pdXsegura = obstaculo.X-obstaculo.zona_seguridad_X;
obstaculo.pdYsegura = obstaculo.fdYsegura;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   CONTROLADOR   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%diseño del controlador predictivo que mantiene el barco a la
velocidad y
%trayectoria deseada (punto de operación nominal)

status = mpcverbosity('off'); %para que no salgan mensajes

mpcobj = mpc(barco);

%horizonte de predicción (25 pasos --> Ts*25=0.5s)
mpcobj.PredictionHorizon = 60;%25; %poner 60 o 25 (inest)
mpcobj.ControlHorizon = 2;%5; %poner 5 o 2 (+ aprop safe region)

%limitación de la aceleración: +/-0.2 m/s^2
mpcobj.ManipulatedVariables(1).RateMin = -0.2*Ts;
mpcobj.ManipulatedVariables(1).RateMax = 0.2*Ts;

%limitación de la velocidad de la pala el timón: 6°/s
mpcobj.ManipulatedVariables(2).RateMin = -pi/30*Ts;
mpcobj.ManipulatedVariables(2).RateMax = pi/30*Ts;

%rangos de operación de la aceleración y el timón
mpcobj.ManipulatedVariables(1).ScaleFactor = 2; %¿?
mpcobj.ManipulatedVariables(2).ScaleFactor = 0.2;

%como solo hay dos variables de control solo se puede tener offset
nulo
%(tracking perfecto) en dos salidas
%Tracking perfecto para Y y V (X y phi variarán)
mpcobj.Weights.OutputVariables = [0 30 0 1]; %¿?

%operación nominal planta discreta
mpcobj.Model.Nominal = struct('U',U,'Y',Y,'X',X,'DX',DX);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   RESTRICCIONES INICIALES DE ENTRADA/SALIDA   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%restricciones:
%   E*u + F*y <= G   (define el área a evitar)
%u: señal de control, y=x: salidas=estados,

%son tres rectas:  no puede pasar de la de arriba, no puede pasar de
la de
%abajo y no puede pasar de la recta que lo desvía del obstáculo

%dentro del horizonte de predicción el barco no podrá salir del área
definida por las 3 rectas

%al siguiente intervalo de control se recalcula el área a partir de la
%nueva posición y velocidad del barco.  Y así sucesivamente hasta que
%sobrepasa el obstáculo.

%primera:  cota superior para y -->  no puede salirse del canal por
arriba  y<=6
E1 = [0 0];
F1 = [0 1 0 0];
G1 = margen;

%segunda:  cota inferior para y -->  no puede salirse del canal por
abajo  y>=-6
E2 = [0 0];
F2 = [0 -1 0 0];
G2 = margen;

%tercera:  restricción "fake" para el caso de que no haya obstáculo,
%(repetimos la segunda)
E3 = [0 0];
F3 = [0 -1 0 0];
G3 = 6;

setconstraint(mpcobj, [E1;E2;E3], [F1;F2;F3], [G1;G2;G3], [1;1;0.1]);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%el MPC adaptativo usa un modelo NL de la planta diferente en cada
intervalo de

%la tercera restricción se actualiza a cada intervalo de control.  el
barco
%tendrá que ir por encima de esta recta segun se indica en el fichero
%actualizar_restricciones.m

%estados
estados = mpcstate(mpcobj);

%tiempo de simulación
T = 0:Ts:6;

%variables que se guardan para representarlas
pend = zeros(length(T),1);
ord = zeros(length(T),1);
ympc = zeros(length(T),size(Cd,1));
umpc = zeros(length(T),size(Bd,2));
PosX=T'*0;
PosY=T'*0;

%Simulación
x = x0;
u = u0;
for k = 1:length(T)

    %planta y señales en intervalo k
    [Ad,Bd,Cd,Dd,U,Y,X,DX] = modelo_barco(Ts,x,u);
    ympc(k,:)=Y(:);

```

```

%detección del obstáculo
posX = x(1); PosX(k)=posX;
posY = x(2); PosY(k)=posY;
%distancia de la posic del barco a la posic del obstáculo
distancia_obst = sqrt( (obstaculo.X - posX)^2 + (obstaculo.Y -
posY)^2 );

%variable booleana "esta_cerca"
esta_cerca = (distancia_obst < obstaculo.DistanciaDeteccion);

%variable booleana "esta_en_trayectoria" (si < 8)
esta_en_trayectoria = ( abs(obstaculo.Y - posY) < 8 );

%variable booleana "detectado"
detectado = ( esta_cerca && (posX < obstaculo.fdXsegura) &&
esta_en_trayectoria );

%actualización de las restricciones (rectas que definen por donde
debe pasar el barco)
[E,F,G,pend(k),ord(k)] =
actualizar_restricciones(x,detectado,obstaculo,margen);

% nueva planta.
newPlant = ss(Ad,Bd,Cd,Dd,'Ts',Ts);
newNominal = struct('U',U,'Y',Y,'X',X,'DX',DX); %condiciones
nominales

% preparar restricciones
options = mpcmoveopt;
options.CustomConstraint = struct('E',E,'F',F,'G',G);

% evolución óptima.
[u,Info] =
mpcmoveAdaptive(mpcobj,estados,newPlant,newNominal,Y(:),referencia,[],
options);
umpc(k,:) = u';

% actualizar planta |k+1|.
x = Ad * x + Bd * u;
end

mpcverbosity(status);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   REPRESENTACIÓN   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%casco
x1=[2.04 , 2.04 , 2.59 , 10.87 , 12.11 , 10.37 , 10 , 5.36 , 4.56 ,
2.04];
y1=[5.4 , 4.38 , 3.69 , 3.69 , 5.37 , 5.37 , 5 , 4.97 , 5.37 , 5.4];
V=[x1(:) y1(:)];%vertices
F=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10];%cara
C=[0 0 1];%color
%superestructura
x2=[4.56 , 2.51 , 2.51 , 4.56];
y2=[5.37 , 5.37 , 6.41 , 6.41];
V=[V;x2(:) y2(:)];
F=[F;11 12 13 14*ones(1,7)];
C=[C;0 1 0];
%puente
x3=[4.56 , 3.68 , 3.68 , 4.56];
y3=[6.41 , 6.41 , 7.02 , 7.02];
V=[V;x3(:) y3(:)];
F=[F;15 16 17 18*ones(1,7)];
C=[C;1 0 0];
%carga
x4=[6 , 6 , 9.68 , 9.68];
y4=[4.97 , 6.57 , 6.57 , 4.97];
V=[V;x4(:) y4(:)];
F=[F;19 20 21 22*ones(1,7)];
C=[C;0.7 0.8 0.6];
%escalado
eslora=5;
V=V*eslora/max(max(V));

f=figure;
axis([0 100 -20 20]),hold on,
plot(Costa_Norte(:,1),Costa_Norte(:,2),'k'),fill(Costa_Norte(:,1),Costa_Norte(:,2),[0.9 0.9 0.9])
plot(Costa_Sur(:,1),Costa_Sur(:,2),'k'),fill(Costa_Sur(:,1),Costa_Sur(:,2),[0.9 0.9 0.9])
plot(isla(:,1),isla(:,2),'k'),fill(isla(:,1),isla(:,2),[0.9 0.9 0.9])

```



```
% zona segura
rectangle('Position',[obstaculo.pdXsegura,obstaculo.pdYsegura,...
    (obstaculo.zona_seguridad_X)*2,(obstaculo.zona_seguridad_Y)*2],...
    'EdgeColor','r','facecolor',[0.9 0.9 0.9],'linestyle','--');

% obstaculo.
rectangle('Position',[obstaculo.pdX,obstaculo.pdY,obstaculo.largo,obst
aculo.ancha],'facecolor','y');
plot(obstaculo.X,obstaculo.Y,'rx');%centro

xlabel('X');
ylabel('Y');

X = [0;50;100];
for k = 1:length(pend)
    h=patch('faces',F,'vertices',V+[PosX(k)                                PosY(k) -
2], 'FaceVertexCData',C, 'FaceColor', 'flat');
    pause(0.1),delete(h)
    plot(ympc(1:k,1),ympc(1:k,2),'k')
    Y = pend(k)*X + ord(k); %recta
    plot(X,Y,'g')
end
h=patch('faces',F,'vertices',V+[PosX(k)                                PosY(k) -
2], 'FaceVertexCData',C, 'FaceColor', 'flat');

x=ympc;
figure,subplot(221),plot(T,x(:,1)),title('x')
subplot(222),plot(T,x(:,2)),title('y')
subplot(223),plot(T,x(:,3)),title('\phi')
subplot(224),plot(T,x(:,4)),title('v')

u=umpc;
figure,subplot(211),plot(T,u(:,1)),title('aceleración')
subplot(212),plot(T,u(:,2)),title('delta')
```